Fomesoutra.com
ça soutra!

EXERCICES RÉSOLUS

PREMIÈRE S

PHYSIQUE-CHIMIE

JEAN-PIERRE DURANDEAU
ROGER BAUTRANT
PAUL BRAMAND
RÉGIS MARTEGOUTES
ROGER SAHUN
GEORGES THOMASSIER

HACHETTE
Éducation

Conception de la maquette intérieure : MÉDIAMAX

Couverture : GRAPHIR

Schémas : Rémi Picard

Composition, mise en page : NDL Communication

PRÉFACE

Cet ouvrage vous propose plus de 200 exercices corrigés. Il répond à une double nécessité :

– vous entraîner, car il est évident qu'une simple lecture du cours s'avère insuffisante pour apprendre une leçon. La mise en œuvre des connaissances dans des situations-problèmes constitue, à cet égard, une activité formatrice indispensable ;

– vous permettre de vérifier votre compréhension des notions du programme. En confrontant votre solution à celle du corrigé, vous jugerez de la qualité de votre apprentissage. Ainsi, lorsque les résultats du corrigé coïncideront avec votre propre solution, vous pourrez aborder sereinement de nouvelles acquisitions.
Dans le cas contraire, vous pourrez remédier à la difficulté rencontrée en relisant l'énoncé, en particulier les hypothèses qui y figurent, et en comparant votre démarche à celle du corrigé. Éventuellement, vous reviendrez au manuel utilisé en classe.

Chaque grand thème du programme fait l'objet d'un chapitre comportant les rubriques suivantes :

■ Un **résumé du cours**, axé sur les notions fondamentales.

■ Un large éventail d'**énoncés d'exercices** progressifs, allant de l'exercice de simple restitution des connaissances au problème de réinvestissement des savoirs et des méthodes dans des situations plus complexes.
La difficulté des exercices est signalée par des losanges placés en regard des énoncés (**aucun losange** : exercice de base ; ♦ : exercice nécessitant davantage de méthode et de réflexion ; ♦♦ : exercice plus difficile), de façon que chacun puisse évaluer son niveau.
Le thème annoncé dans le titre d'un exercice vous permet de choisir les notions à approfondir sans être obligé de traiter les questions déjà assimilées.

■ Des **corrigés d'exercices** détaillés et commentés, indiquant clairement les étapes de leur résolution.

Vous disposez ainsi d'un outil dont nous espérons que vous saurez tirer le meilleur parti.

Les auteurs.

SOMMAIRE

1 LE MOUVEMENT 8

2 LA VITESSE 19

3 LA FORCE - LES INTERACTIONS 35

4 PRINCIPE DE L'INERTIE 53

5 ROTATION D'UN SOLIDE AUTOUR D'UN AXE FIXE 71

X 6 PRINCIPE DE CONSERVATION DE L'ÉNERGIE - TRANSFERTS D'ÉNERGIE 85

7 ÉNERGIE MÉCANIQUE D'UN SYSTÈME 93

X 8 BILAN ÉNERGÉTIQUE - TRAVAIL D'UNE FORCE 103

++ 9 LES MACHINES THERMIQUES 115

10 BILAN ÉNERGÉTIQUE D'UN RÉCEPTEUR ÉLECTRIQUE 131

11 BILAN ÉNERGÉTIQUE D'UN GÉNÉRATEUR ÉLECTRIQUE 145

12 BILAN ÉNERGÉTIQUE D'UNE CHAÎNE ÉLECTRIQUE 159

13 PRODUCTION ET TRANSPORT DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE 177

14 RADIOACTIVITÉ - ÉNERGIE NUCLÉAIRE 189

15 SOLUTIONS AQUEUSES 203

16 NOTION DE COUPLE OXYDANT-RÉDUCTEUR 213

17 COUPLE H^+/H_2 - CLASSIFICATION ÉLECTROCHIMIQUE 223

18 NOTION DE POTENTIEL D'OXYDORÉDUCTION 237

19 NOMBRE D'OXYDATION 251

20 PILES, ACCUMULATEURS ET ÉLECTROLYSEURS 267

21 CHALEUR DE RÉACTION 283

22 POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE PAR LES OXYDES D'AZOTE ET DE SOUFRE 297

23 DISSOLUTION DES COMPOSÉS IONIQUES ET MOLÉCULAIRES DANS L'EAU 311

24 FONCTIONS ORGANIQUES OXYGÉNÉES 321

25 OXYDATION DE COMPOSÉS ORGANIQUES 333

1

LE MOUVEMENT

RÉSUMÉ DU COURS

Référentiels

- Un référentiel est un solide par rapport auquel on étudie le mouvement d'un objet. Le choix du référentiel est guidé par la nature des expériences à observer et à interpréter. À un référentiel, on associe un repère constitué par une origine et des axes fixes.

- Le référentiel de Copernic est un solide imaginaire constitué par le centre* du système solaire et des étoiles lointaines. Si, au lieu de choisir le centre du système solaire, on choisit le centre du Soleil, le référentiel est dit héliocentrique. De tels référentiels sont utilisés pour l'étude des mouvements des planètes ou des sondes interplanétaires.

- Le référentiel géocentrique est lié au centre de la Terre, les axes d'un repère géocentrique restant parallèles à ceux d'un repère de Copernic. Un tel référentiel est utilisé pour l'étude des marées, le mouvement des satellites.

- Le référentiel terrestre est lié à la Terre : on l'utilise pour étudier les mouvements effectués sur Terre.

---

* Centre d'inertie.

Dans un référentiel donné, la trajectoire d'un point mobile est l'ensemble des positions successivement occupées par ce point. La trajectoire d'un point mobile dépend du choix du référentiel.

■ Mouvement de translation d'un solide

Au cours d'un mouvement de translation quelconque d'un solide, tout segment du solide reste parallèle à lui-même. Les trajectoires des différents points sont superposables.

On distingue des translations rectilignes, circulaires, curvilignes.

■ Mouvement de rotation d'un solide autour d'un axe fixe

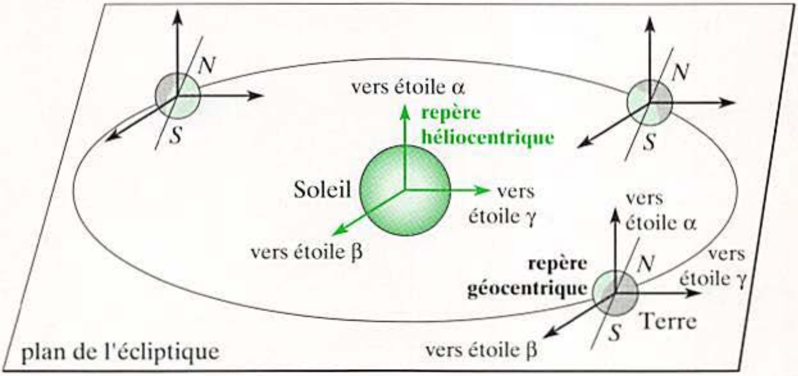
Chaque point du solide décrit un cercle dans un plan perpendiculaire à l'axe et centré sur l'axe de rotation.

■ Mouvement des corps célestes

■ **La Terre** : dans un repère héliocentrique, le centre de la Terre décrit, dans le plan de l'écliptique, une trajectoire quasi circulaire de période une **année** (365,25 jours).

Dans un repère géocentrique, un point de la Terre est animé d'un mouvement de rotation uniforme autour de l'axe des pôles : c'est le mouvement propre de la Terre, de période 86 164 s (**jour sidéral**).

L'inclinaison constante de l'axe de rotation propre de la Terre par rapport à la normale au plan de l'écliptique est responsable de l'inégalité des jours et des nuits.



Le mouvement du Soleil dans le repère terrestre est appelé mouvement apparent. Dans ce repère, le Soleil se lève vers l'Est et se couche vers l'Ouest.

■ **La Lune** : le centre de la Lune est animé, dans le référentiel géocentrique, d'un mouvement circulaire uniforme autour du centre de la Terre. Le plan de sa trajectoire est incliné de 6,5° par rapport au plan de l'écliptique. La durée d'une période est de 27,3 jours environ. Ce mouvement est responsable des phases de la Lune.

■ **Les planètes** : elles sont au nombre de neuf, dont cinq seulement sont visibles à l'œil nu (Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne). Leur centre est animé, comme celui de la Terre, d'un mouvement circulaire uniforme autour du centre du Soleil.

■ **Les étoiles** : elles sont fixes dans le référentiel de Copernic. Dans le référentiel terrestre, les étoiles de l'hémisphère Nord décrivent en un jour un cercle centré sur l'étoile polaire.

Référentiel et relativité du mouvement

1.1 Choix du référentiel

On considère trois référentiels : le référentiel géocentrique, le référentiel de Copernic, le référentiel terrestre.

1° Définir les référentiels cités.

2° Quel référentiel est-il préférable de choisir pour étudier :

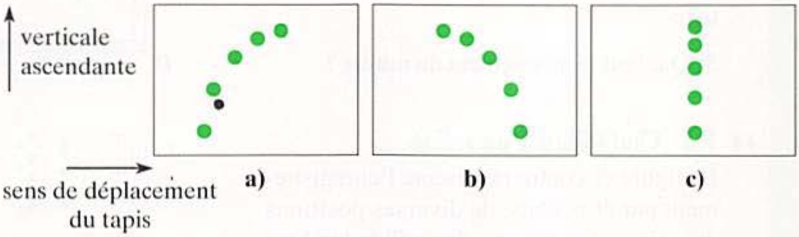
a) le mouvement du centre de la Terre autour du centre du Soleil ?

b) le mouvement d'un satellite autour de la Terre ?

c) le mouvement d'un avion ?

1.2 Relativité du mouvement

Sur un tapis roulant avançant à vitesse constante, Bernard est immobile. Il lance, verticalement et vers le haut, une balle. En dehors du tapis roulant, Paul, immobile, observe la balle.
On a dessiné trois trajectoires possibles de la balle dans la phase de montée.



1° Quelle est la trajectoire observée par Bernard ?

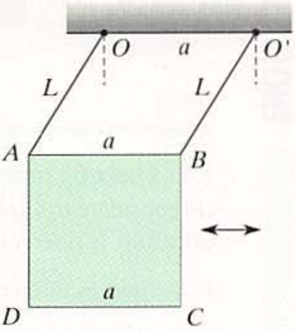
2° Quelle est la trajectoire observée par Paul ?

3° Tracer approximativement les trajectoires observées par Paul et Bernard au cours de la descente de la balle.

Mouvements de solides

1.3 Reconnaître un mouvement de translation

Un tableau rectangulaire est suspendu par deux fils inextensibles et de même longueur L, comme l'indique la figure de la page 12. ($OO' = AB = a$.) Il peut osciller dans le plan vertical, les fils restant tendus.



1° Quelles sont les trajectoires des points A et B dans le référentiel terrestre ?

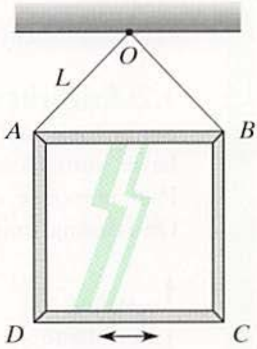
2° *a*) Montrer que le vecteur $\overrightarrow{AB}$ reste constant au cours du mouvement.

b) En déduire le mouvement du tableau.

3° Dessiner le tableau dans deux autres positions.

♦ 1.4 Reconnaître un mouvement de rotation autour d'un axe

Un miroir carré de côté L est suspendu à l'aide de deux fils inextensibles de même longueur L. Il peut osciller dans le plan vertical, les fils restant toujours tendus.



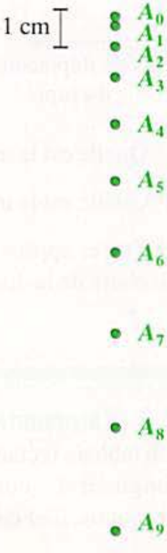
1° Quelles sont les trajectoires de A et de B dans le référentiel terrestre ?
Que peut-on en conclure ?

2° Dessiner le miroir dans deux autres positions.

3° Quel est le mouvement du miroir ?

♦♦ 1.5 Chute libre d'un solide

La figure ci-contre représente l'enregistrement par étincelage de diverses positions du centre d'inertie A d'un solide tombant en chute libre. La période des étincelles (base de temps) est $\tau = 40$ ms.



1° En prenant comme origine des dates, l'instant du départ du point A dans la position A_0, indiquer les dates du passage de A en A_3, A_5, A_7.

2° Quelle est la durée du déplacement du point A entre les positions A_1 et A_7 ?

3° Quelle serait la date du passage du point A en A_6 en prenant pour origine des dates l'instant du passage de A en A_2 ?

Repérage d'un point

1.6 Jeu de billes

Au cours d'un jeu de billes se déroulant sur un terrain plat et horizontal, on veut repérer précisément la position de plusieurs billes.
En O se trouve le trou, centre du jeu, et les distances sont mesurées en mètre. On choisit un repère orthonormé $(O\,;\vec{i},\vec{j})$.

1° Les coordonnées de la bille A étant $x_A = 0{,}31$ et $y_A = 0{,}5$, représenter le repère et la position de la bille A à l'échelle $1/10$.

2° Les positions des deux autres billes sont données par les relations :
$\overrightarrow{OB} = 0{,}5\vec{i} + 0{,}5\vec{j}$; $\overrightarrow{OC} = 0{,}5\vec{i} + 0{,}4\vec{j}$.
Placer B et C sur le schéma.

3° *a*) Mesurer la distance de chacune des billes au trou.

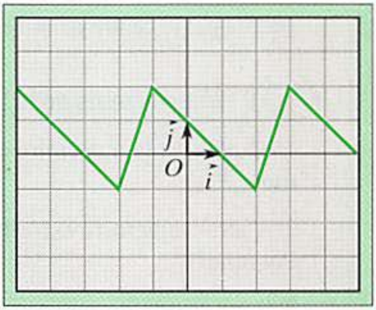
b) Quelle est la bille la plus proche du trou ?

4° Retrouver les distances précédentes par le calcul.

Mouvement d'un point

1.7 Exploitation d'un oscillogramme

Le document ci-dessous représente l'écran d'un oscilloscope. On s'intéresse à la trajectoire du spot, et pour cela on a représenté le repère $(O\,;\vec{i},\vec{j})$.



1° La tension visualisée sur l'oscillogramme est-elle : périodique ? sinusoïdale ? constante ?

2° Le départ du spot à gauche de l'écran est pris comme origine des dates $(t = 0)$. La base de temps utilisée est 1 ms/DIV.
À quel instant le spot atteint-il :

a) la position $P_1\,(-3\,;0)$?

b) la position $P_2\,(2\,;-1)$?

3° En quelles positions P_a et P_b se trouve le spot :

a) à la date $t = 1$ ms (position P_a) ? *b*) à la date $t' = 5$ ms (position P_b) ?

4° *a*) Quelle durée s'écoule entre les passages du spot en $P'\,(-1\,;2)$ et $P''\,(3\,;2)$?

b) Comment se nomme cette durée ?

1.8 Mouvements de la Terre

1° Quel est le mouvement du centre de la Terre :

a) dans le référentiel héliocentrique ? *b*) dans le référentiel géocentrique ?

2° Quel est le mouvement de la Terre :

a) dans le référentiel géocentrique ? *b*) dans le référentiel terrestre ?

3° Quelle est l'interprétation :

a) des jours et des nuits ? *b*) des saisons ?

4° Quelle est la différence entre un jour solaire et un jour sidéral ?

1.9 Mouvements du centre de la Terre

1° Dans le repère héliocentrique :

a) quelle est la trajectoire du centre de la Terre ?

b) quelle est la période de ce mouvement ?

2° La distance Terre-Soleil est environ égale à $150 \,.\, 10^6$ km .

a) Quelle est, dans le repère héliocentrique, la longueur de la trajectoire décrite par le centre de la Terre au cours de cette période ?

b) Quelle est, dans le repère héliocentrique, la longueur de la trajectoire décrite par le centre de la Terre en un jour ?

♦ 1.10 Mouvements de la Lune

1° Quelle est la trajectoire du centre de la Lune dans le référentiel géocentrique ?

2° Cette trajectoire est-elle celle que nous observons depuis la Terre ? Pourquoi ?

3° La période du mouvement du centre de la Lune dans le référentiel géocentrique est de 27,3 jours .

a) La distance moyenne de la Terre à la Lune étant de 400 000 km , quelle est la longueur de la trajectoire parcourue par le centre de la Lune au cours de cette durée ?

b) La Lune, en se déplaçant autour de la Terre, présente toujours la même face ; que peut-on en conclure ?

CORRIGÉS DES EXERCICES

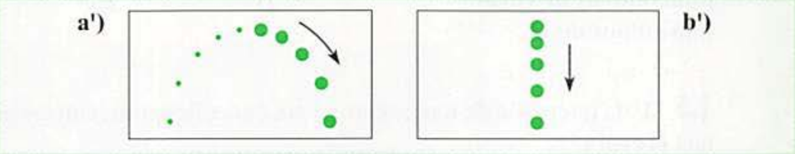
1.1 1° Voir le « résumé du cours ».

2° *a*) le référentiel de **Copernic** ; *b*) le référentiel **géocentrique** ;
c) le référentiel **terrestre**.

1.2 1° Bernard est immobile dans le référentiel du tapis roulant ; **le mouvement de la balle lancée verticalement dans ce référentiel est rectiligne et vertical** (c).

2° Paul est immobile dans le référentiel terrestre, donc, pour lui, le tapis roulant (et ce qu'il entraîne) est mobile. **Ainsi, pour Paul, la balle monte en avançant** (a). Tout se passe pour Paul comme si, par rapport à la Terre, la balle avait été lancée vers le haut et vers l'avant.

3° Pour Paul, la balle va sembler **descendre en avançant** (a').
Pour Bernard, la balle va sembler **redescendre verticalement** (b').

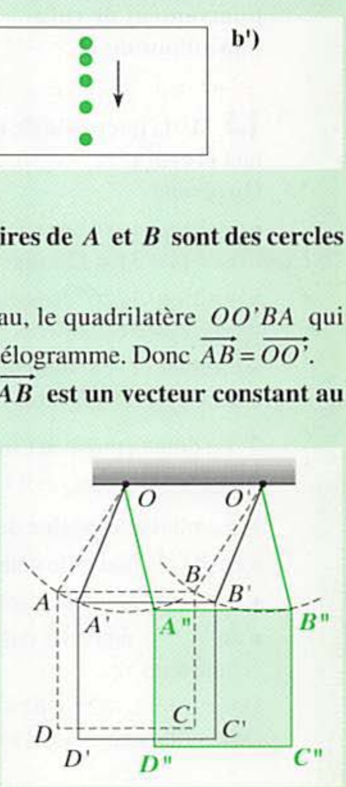


1.3 1° Les fils restant tendus, **les trajectoires de *A* et *B* sont des cercles de centres *O* et *O'*, de rayon *l*.**

2° *a*) Quelle que soit la position du tableau, le quadrilatère *OO'BA* qui garde ses côtés opposés égaux est un parallélogramme. Donc $\overrightarrow{AB}=\overrightarrow{OO'}$.
Comme $\overrightarrow{OO'}$ est un vecteur constant, $\overrightarrow{AB}$ est un vecteur constant au cours du mouvement du tableau.

b) *ABCD* étant un rectangle, $\overrightarrow{AB}=\overrightarrow{DC}$, vecteur constant au cours du mouvement.
Le tableau est animé d'un mouvement de **translation** car tout segment reste parallèle à lui-même.
Ce mouvement de translation est circulaire car les trajectoires des différents points sont circulaires.

3° *Cf.* la figure.



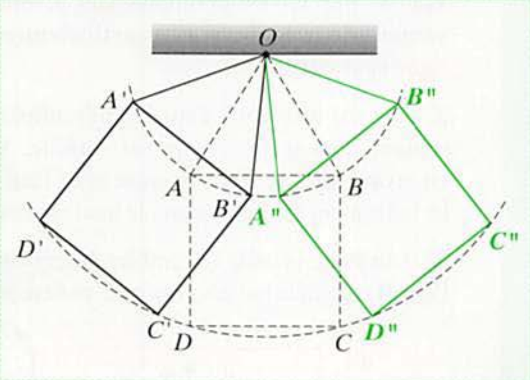
1.4 1° Les distances OA et OB étant constantes et égales à l, **les deux points A et B décrivent un arc de cercle** de centre O et de rayon l.
La distance AB restant constante, cette « corde » se déplace sur le cercle et ne reste donc pas parallèle à sa position d'équilibre (horizontale).

2° Pour chaque position, on trace une corde $A'B'$ ou $A''B''$ de longueur l ; on trace, à partir de cette corde, le carré de côté l, et on achève en traçant les fils de suspension (OA', OB') et (OA'', OB'').

3° La longueur :

$$OC = OD$$

restant constante, les points C et D décrivent un cercle de centre O et de longueur OD. Tous les points du miroir décrivent des cercles de centre O. **Le miroir est animé d'un mouvement de rotation autour de O.**



1.5 1° L'intervalle de temps entre deux étincelles consécutives est constant et égal à τ.
On obtient :

- position A_3, 4e étincelle, date $\boldsymbol{t_3 = 3\tau = 120}$ **ms** ;
- position A_5, 6e étincelle, date $\boldsymbol{t_5 = 5\tau = 200}$ **ms** ;
- position A_7, 8e étincelle, date $\boldsymbol{t_7 = 7\tau = 280}$ **ms**.

n° d'étincelle	date	indice de la position
1re	0	0
2e	τ	1
3e	2τ	2
....	....	....
ne	$(n-1)\tau$	$n-1$

2° La durée entre deux instants est égale à la différence des dates :
$\Delta t = t_7 - t_1 = 7\tau - \tau = 6\tau$, donc $\boldsymbol{\Delta t = 6\tau = 240}$ **ms**.

3° La nouvelle origine des dates étant l'instant du passage, on a :

- en A_2 : la nouvelle date $t'_2 = 0$ au lieu de $t_2 = 2\tau$;
- en A_3 : la nouvelle date $t'_3 = \tau$ au lieu de $t_3 = 3\tau$;
- en A_6 : la nouvelle date t'_6 sera donc obtenue en retranchant 2τ à l'ancienne date t_6.

Donc $t'_6 = t_6 - 2\tau = 6\tau - 2\tau = 4\tau$, d'où $\boldsymbol{t'_6 = 4\tau = 160}$ **ms**.
Ce résultat correspond bien à la durée entre les passages en A_2 et A_6 :

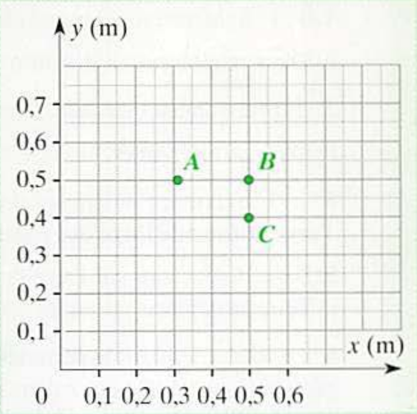
$$\Delta t = t_6 - t_2 = 4\tau.$$

1.6 1° Échelle 1/10 : à 10 cm = 0,1 m sur le terrain, correspond 1 cm sur le graphique. **Position de A : voir le graphique.**

2° $x_B = 0{,}5$; $y_B = 0{,}5$.
$x_C = 0{,}5$; $y_C = 0{,}4$.

3° *a*) Avec une règle, mesurons les distances OA, OB et OC.

- $d(OA) = 5{,}8$ cm : la **bille A** se trouve à **58 cm** du trou.
- $d(OB) = 7{,}1$ cm : la **bille B** se trouve à **71 cm** du trou.
- $d(OC) = 6{,}4$ cm : la **bille C** se trouve à **64 cm** du trou.



Graphique réalisé à l'échelle 1/2 par rapport à ce qui vous est demandé : 1 cm

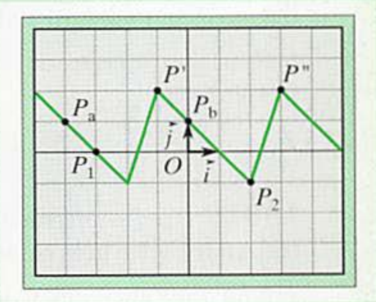
b) La **bille A** est la plus proche du trou.

4° $d(OA) = \sqrt{x_A^2 + y_A^2} = \sqrt{0{,}3^2 + 0{,}5^2} = 0{,}58$ m, soit **58 cm**.
$d(OB) = \sqrt{x_B^2 + y_B^2} = \sqrt{0{,}5^2 + 0{,}5^2} = 0{,}71$ m, soit **71 cm**.
$d(OC) = \sqrt{x_C^2 + y_C^2} = \sqrt{0{,}5^2 + 0{,}4^2} = 0{,}64$ m, soit **64 cm**.

1.7 1° La tension visualisée est en « dents de scie » ; elle est **périodique**.

2° Ce qui permet de trouver la date est l'abscisse, une division en abscisse étant balayée en 1 ms.

a) P_1 a pour abscisse -3 ; P_1 se trouve à 2 DIV du bord gauche de l'écran, départ du spot ; donc :
$\boldsymbol{t_1 = 2 \times 1 = 2}$ **ms**.



b) P_2 a pour abscisse 2 et se trouve donc à $2 + 5 = 7$ DIV du bord gauche de l'écran ; donc $\boldsymbol{t_2 = 7 \times 1 = 7}$ **ms**.

3° *a*) À $t = 1$ ms, **le spot se trouve en P_a** (il a parcouru 1 DIV en abscisse).

b) À $t = 5$ ms, **le spot se trouve en P_b**.

4° *a*) $x_b - x_a = 3 - (-1) = 4$ DIV.
Il s'écoule donc $\boldsymbol{4 \times 1 = 4}$ **ms**.

b) Cette durée correspond à la **période**.

1.8 1° *a*) Mouvement **quasi circulaire uniforme**, de période 1 an.

b) Dans ce référentiel, le centre de la Terre est **immobile**.

2° *a*) Mouvement de **rotation uniforme** autour de l'axe des pôles.

b) Dans ce référentiel, la Terre est **immobile**.

3° *a*) L'existence des jours et des nuits s'explique par **la rotation de la Terre autour de l'axe des pôles** (rotation propre).

b) Il y a des saisons car **l'axe de la Terre garde une direction fixe** lorsque la Terre se déplace autour du Soleil.

4° Le jour sidéral est la période de révolution de la Terre dans le référentiel géocentrique : durée entre deux passages consécutifs **d'une étoile lointaine au méridien d'un lieu** (86 164 s , soit 23 h 56 min 4 s). Le jour solaire est la durée entre deux passages consécutifs **du Soleil au méridien** (24 h). La petite différence provient du fait que la Terre tourne autour du Soleil.

1.9 1° *a*) C'est une **ellipse** très voisine d'un cercle dont le centre serait pratiquement confondu avec le centre du Soleil.

b) La période de ce mouvement est de **une année**.

2° *a*) La Terre parcourt une circonférence de longueur :

$$L_a = 2\pi \,.\, R = 2\pi \times 150 \,.\, 10^6 = \mathbf{942 \,.\, 10^6\ km}\ ,$$

soit environ 1 milliard de kilomètres !

b) En un jour, le centre de la Terre décrira une portion de trajectoire 365,25 fois plus petite.

$$L_{1\text{jour}} = \frac{942 \,.\, 10^6}{365{,}25} = 2{,}58 \,.\, 10^6, \quad \text{soit} \quad L_{1\text{jour}} \approx \mathbf{2{,}6\ millions\ de\ kilomètres}\ .$$

1.10 1° Dans le référentiel géocentrique, le centre de la Lune décrit une **trajectoire à peu près circulaire**.

2° Non, car l'observation de la Lune est effectuée dans un référentiel terrestre et non géocentrique ; or la trajectoire dépend du référentiel choisi.

3° *a*) Le centre de la Lune décrit une circonférence de longueur : $L = 2\pi \,.\, R$; donc $L = 2\pi \times 400\,000 = 2\,512\,000$, soit $L \approx \mathbf{2{,}51 \,.\, 10^6\ km}$.

b) On peut affirmer que la Lune tourne sur elle-même. En effet, si elle ne le faisait pas, de la Terre on verrait successivement des portions différentes de la surface lunaire (comme si nous lui tournions autour).
Comme on observe toujours la même face, **on peut affirmer que la rotation de la Lune sur elle-même** (mouvement propre) **a la même période que le mouvement du centre de la Lune autour de la Terre** (soit 27,3 jours).

2

LA VITESSE

RÉSUMÉ DU COURS

La vitesse

■ La **vitesse moyenne** d'un mobile est le quotient de la longueur L du chemin parcouru par la durée Δt du trajet :

$$\boxed{v = \frac{L}{\Delta t}}$$

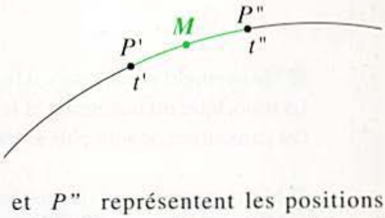
Unités : L en mètre (m) ; Δt en seconde (s) ; v en mètre par seconde $(\mathrm{m\,.\,s^{-1}})$.

■ **La vitesse est relative au référentiel** ; ainsi, un piéton qui marche sur un tapis roulant n'a pas la même vitesse par rapport au tapis que par rapport au sol.

La vitesse instantanée

■ La vitesse instantanée $v(t)$ d'un mobile M à la date t correspond à la vitesse moyenne de ce mobile calculée entre deux dates t' et t'' aussi proches que possible et encadrant la date t :

$$\boxed{v(t) = \frac{P'P''}{t''-t'}}$$



P' et P'' représentent les positions du mobile M respectivement aux dates t' et t''.

Un compteur de vitesse indique à chaque instant t, la vitesse instantanée $v(t)$.

Vecteur vitesse d'un point mobile

Définition :

Le vecteur vitesse $\vec{v}(t)$ d'un point mobile M a pour caractéristiques :

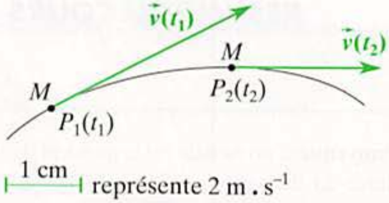
- **une direction** : celle de la tangente à la trajectoire au point P, position occupée par le mobile M à l'instant t ;
- **un sens** : celui du mouvement à cet instant ;
- **une valeur (ou norme)** : égale à la mesure de la vitesse instantanée à cette date t :

$$\| \vec{v}(t) \| = v(t) \ ;$$

- **un point d'application** : le point mobile M.

Représentation :

Le vecteur vitesse instantanée $\vec{v}(t)$ est représenté par un segment fléché dont la longueur sera associée à la valeur de la vitesse par une échelle (correspondance cm ↔ $\mathrm{m \, . \, s^{-1}}$).



Lorsqu'il passe en P_2, le mobile M va moins vite que lorsqu'il passe en P_1 :

$$v_1 = 6 \ \mathrm{m \, . \, s^{-1}} \ ; \ \ v_2 = 4 \ \mathrm{m \, . \, s^{-1}} \, .$$

Différents types de mouvements

Mouvement rectiligne uniforme :

La trajectoire est une droite et la vitesse instantanée est constante. Alors :

$$\boxed{L = v \, . \, \Delta t}$$

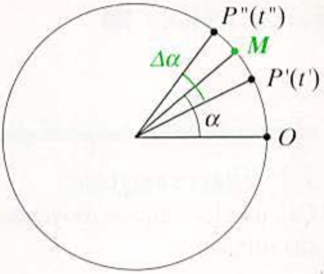
Mouvement rectiligne varié :

La trajectoire est une droite et la valeur de la vitesse instantanée change ; les distances parcourues ne sont plus proportionnelles aux durées de parcours.

Mouvement circulaire uniforme :

La trajectoire est un cercle et la valeur de la vitesse instantanée reste constante ; alors, on peut écrire le chemin parcouru pendant la durée Δt sous la forme : $L = v \, . \, \Delta t$.

■ La vitesse angulaire $\omega(t)$ du point mobile à l'instant t est donnée par la relation :



$$\boxed{\omega(t) = \frac{\Delta\alpha}{t'' - t'}}$$

Unités : α en radian (rad), t en seconde (s) et ω en radian par seconde ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$).

■ L'arc $\overset{\frown}{P'P''}$ décrit par le point mobile M entre les instants t' et t'' est donné par la relation :

$$\boxed{\overset{\frown}{P'P''} = L = R \cdot \Delta\alpha}$$

Unités : α en radian (rad) et 2π (rad) = 360°.

■ La vitesse circonférencielle v et la vitesse angulaire ω sont liées par la relation :

$$\boxed{v = R \cdot \omega}$$

Unités : R en mètre (m), ω en radian par seconde ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$) et v en mètre par seconde ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

■ La période d'un mouvement circulaire uniforme est :

$$\boxed{T = \frac{2\pi}{\omega}}$$

Unités : T en seconde (s) et ω en radian par seconde ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$).

■ La fréquence f est l'inverse de la période :

$$\boxed{f = \frac{1}{T}}$$

Unité : f s'exprime en hertz (Hz).

Vitesse d'un solide

■ **Solide en translation** : tous les points du solide ont, à chaque instant, la même vitesse instantanée. Ils ont donc le même vecteur vitesse $\vec{v}(t)$.

■ **Solide en rotation uniforme autour d'un axe fixe :**

- tous les points du solide ont, à chaque instant, la même vitesse angulaire $\omega(t)$;
- tous les points du solide n'ont pas la même vitesse $v(t)$, les points les plus éloignés de l'axe allant le plus vite ; en effet, $v(t) = R \cdot \omega(t)$, R étant la distance du point à l'axe de rotation.

Durée - Vitesse moyenne

2.1 Vitesse moyenne

Calculer les vitesses moyennes exprimées en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ dans les cas suivants :

1° Au cours d'une course de sprint en athlétisme, un athlète effectue un « 60 m » en 7,5 s .

2° Un avion décolle de Paris à 11 h 00 et se pose à Séville, distante de 1 700 km , à 13 h 15 (heure de Paris).

3° Une course cycliste se déroule sur un parcours de 132 km ; les organisateurs ont fixé le départ à 13 h 30 et prévu l'arrivée à 16 h 50 .

4° Déplacement horizontal du spot d'un oscilloscope utilisé en mode balayage avec une base de temps de 10 ms/DIV (1 division = 1 cm).

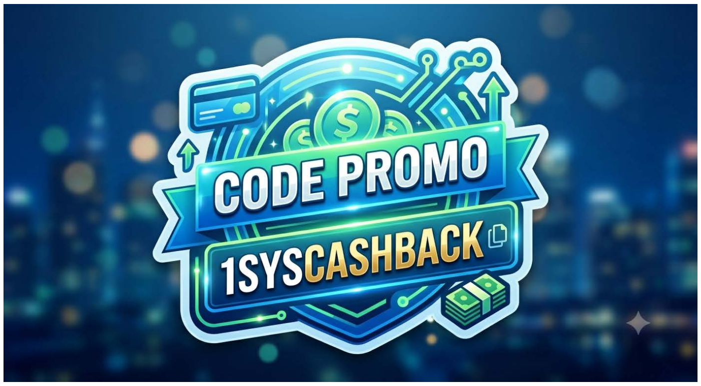
2.2 Voyage en train

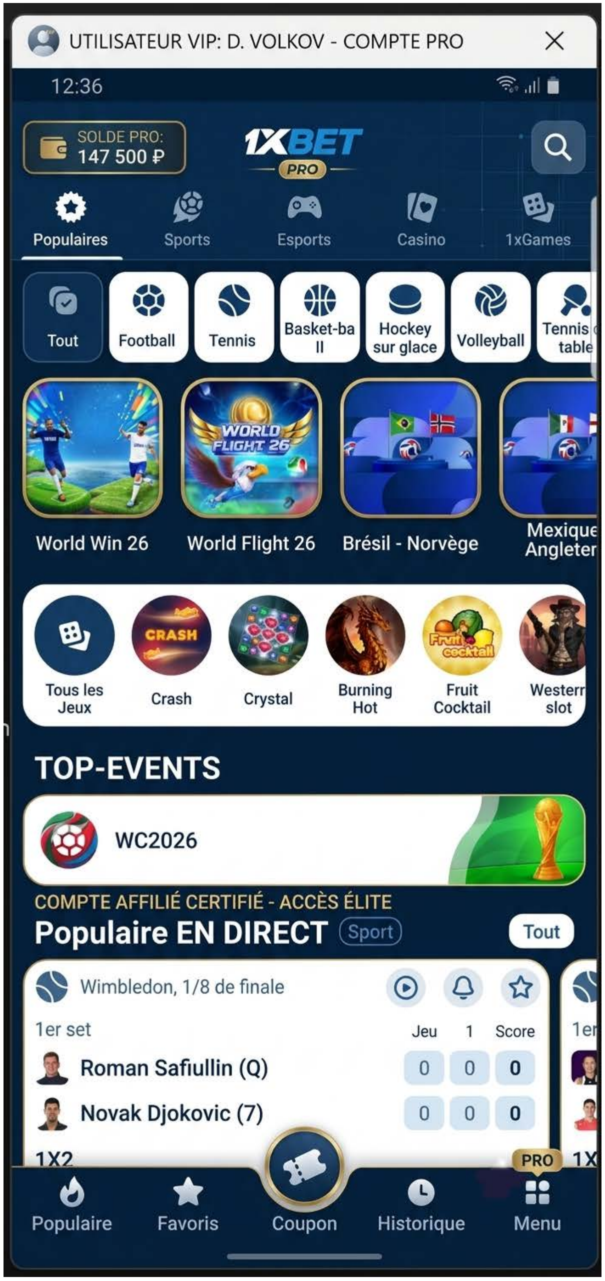
Exploitation de document :

Circulation			10	11
Km	Origine		■	■
0	**Paris-St-Lazare**		0.09	0.12
57	**Mantes-la-Jolie**	A	0.43	0.47
	Mantes-la-Jolie		0.44	0.48
66	Ménerville		│	
72	Bréval		│	
76	Gilles-Guainville		│	
81	Bueil		│	
92	Boisset (Eure)		│	
97	Le Val-David		│	
108	**Évreux-Embranchement**	A	1.15	1.21
	Évreux-Embranchement		■	1.26
118	La Bonneville-sur-Iton			
126	Conches			1.47
134	Romilly-la-Puthenaye			
144	Beaumont-le-Roger			
150	**Serquigny**	A		2.05
	Serquigny			2.06
160	**Bernay**	A		2.14
	Bernay			2.15
174	St-Mards de Fresne			
191	**Lisieux**	A		2.36
	Lisieux			2.37
216	**Mézidon**	A		2.57
	Mézidon			2.58
225	Moult-Argences			
231	Frenouville-Cagny			
239	**Caen**	A		3.18

ÉTAPES D'INSCRIPTION
pour voir comment creer un compte

1XBET
LIVE
MATCHS EN DIRECT
STREAMING LIVE
STREAMING EN DIRECT SUR MOBILE
Profitez du bonus!


CODE PROMO
1SYSCASHBACK


UTILISATEUR VIP: D. VOLKOV - COMPTE PRO

SOLDE PRO: 147 500 ₽

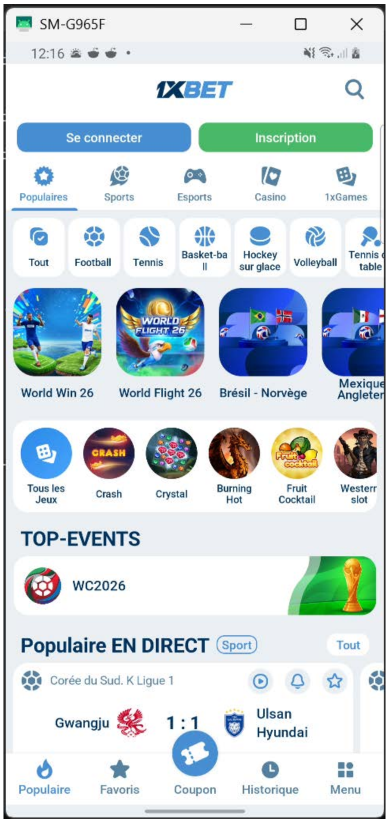
COMPTE AFFILIÉ CERTIFIÉ - ACCÈS ÉLITE

Wimbledon, 1/8 de finale

1er set

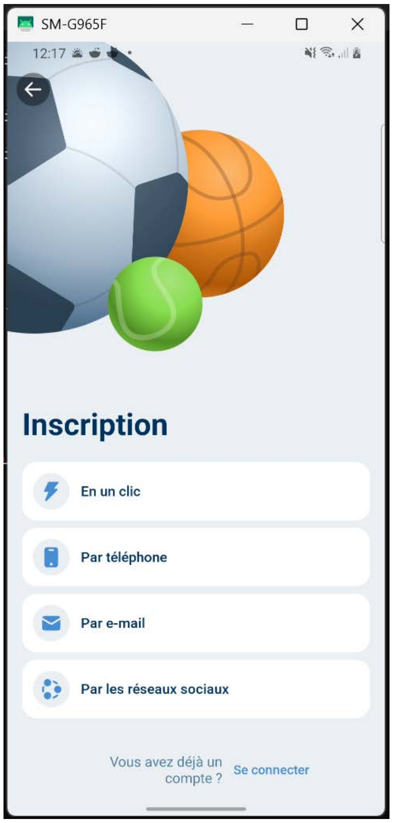
	Jeu	1	Score
Roman Safiullin (Q)	0	0	0
Novak Djokovic (7)	0	0	0

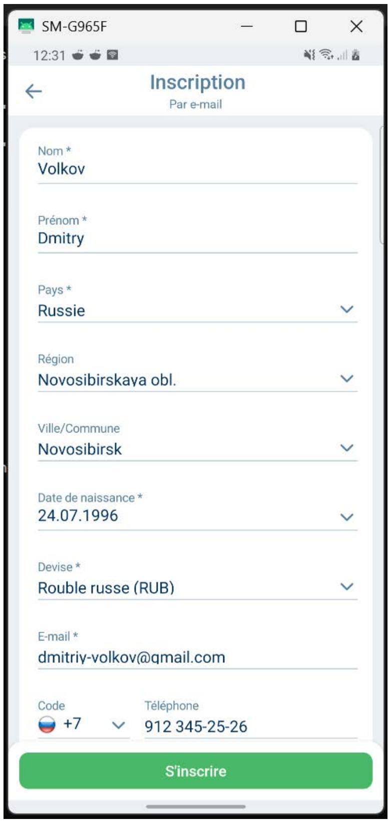
12:36
1XBET PRO
Populaires
Sports
Esports
Casino
1xGames
Tout
Football
Tennis
Basket-ball
Hockey sur glace
Volleyball
Tennis de table
World Win 26
World Flight 26
Brésil - Norvège
Mexique Angleterre
Tous les Jeux
Crash
Crystal
Burning Hot
Fruit Cocktail
Western slot
TOP-EVENTS
WC2026
Populaire EN DIRECT
Sport
Tout
1X2
PRO
Populaire
Favoris
Coupon
Historique
Menu


Corée du Sud. K Ligue 1

Gwangju 1 : 1 Ulsan Hyundai

SM-G965F
12:16
1XBET
Se connecter
Inscription
Populaires
Sports
Esports
Casino
1xGames
Tout
Football
Tennis
Basket-ball
Hockey sur glace
Volleyball
Tennis de table
World Win 26
World Flight 26
Brésil - Norvège
Mexique Angleterre
Tous les Jeux
Crash
Crystal
Burning Hot
Fruit Cocktail
Western slot
TOP-EVENTS
WC2026
Populaire EN DIRECT
Sport
Tout
Populaire
Favoris
Coupon
Historique
Menu


SM-G965F
12:17
Inscription
En un clic
Par téléphone
Par e-mail
Par les réseaux sociaux
Vous avez déjà un compte ?
Se connecter


Inscription

Par e-mail

Nom * Volkov

Prénom * Dmitry

Pays * Russie

Région Novosibirskaya obl.

Ville/Commune Novosibirsk

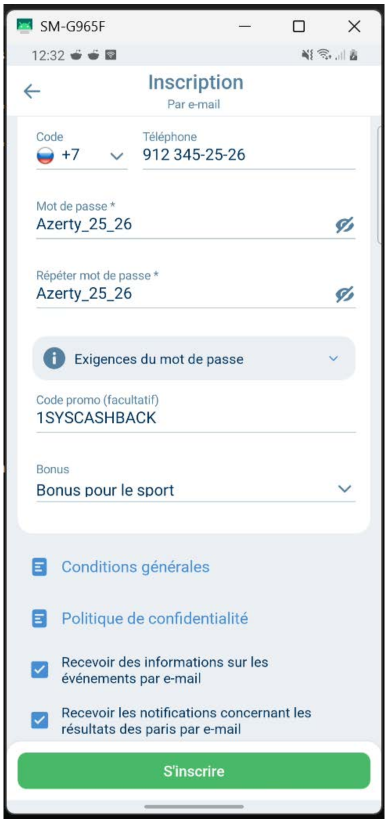
Date de naissance * 24.07.1996

Devise * Rouble russe (RUB)

E-mail * dmitriy-volkov@gmail.com

Code +7 Téléphone 912 345-25-26

SM-G965F
12:31
S'inscrire


Inscription

Par e-mail

Code +7 Téléphone 912 345-25-26

Mot de passe * Azerty_25_26

Répéter mot de passe * Azerty_25_26

Exigences du mot de passe

Code promo (facultatif) 1SYSCASHBACK

Bonus Bonus pour le sport

Conditions générales

Politique de confidentialité

☑ Recevoir des informations sur les événements par e-mail

☑ Recevoir les notifications concernant les résultats des paris par e-mail

SM-G965F
12:32
S'inscrire

À partir du document précédent, extrait d'un indicateur SNCF et comportant les gares desservies, les positions (en km) et l'horaire de passage, rechercher les informations suivantes :

1° *a*) Quelle est la durée réelle de circulation du train n° 10 entre Paris-Saint-Lazare et Évreux ?

b) Quelle est la vitesse moyenne de ce train ?

2° *a*) Quelle est la durée totale du voyage entre Paris-Saint-Lazare et Caen pour le train n° 11 ?

b) Quelle est la durée totale des arrêts dans les gares desservies ?

c) Quelle est la vitesse moyenne du train n° 11 pendant les phases où le train se déplace ?

3° *a*) Pour le train n° 11, la vitesse moyenne pendant les phases de déplacement est-elle la même entre Paris et Mantes qu'entre Mantes et Caen ?

b) Quelle hypothèse peut-on émettre pour expliquer les résultats précédents ?

◆ 2.3 Étape du Tour de France

17^{e} étape : Mardi 23 Juillet (125 km) GAP - L'ALPE-D'HUEZ

Routes empruntées	Itinéraires		km parcourus	Horaire probable
	Hautes-Alpes (05)	Gap (départ fictif)		13 h 28
		Gap (départ réel)	0	13 h 35
N 85		Col Bayard	5	13 h 43
« »		Brutinel	12	13 h 56
« »		La Fare-en-Champsaur	14	13 h 59
« »		La Guinguette	22	14 h 13
« »		Chauffayer	25,5	14 h 20
« »		Le Motty	33	14 h 33
« »	**Isère (38)**	Corps	38	14 h 42
« »		Quet-en-Beaumont	47	14 h 57
« »		La Salle-en-Beaumont	50,5	15 h 04
« »		Les Égats	53,5	15 h 09
« »		Les Terrasses	55,5	15 h 12
« »		La Mûre N 85/ D 116/ D 114	61,5	15 h 23
D 114		Carrefour D 114/ D 26	63,5	15 h 27
D 26		Roizon	67	15 h 33
« »		Sievoz	69,5	15 h 37
« »		Carrefour D 26/ D 526	73	15 h 43
D 526		Valbonnais	76,5	15 h 50
« »		Entraigues	79,5	15 h 55
« »		Le Perier	86,5	16 h 07
« »		Les Daurens	89	16 h 12
« »		La Chalp-de-Chantelouve	90,5	16 h 14
« »		Chantelouve	92,5	16 h 18
« »		Col d'Ornon	96	16 h 24
« »		Ornon (Le Rivier)	99,5	16 h 30
« »		Ornon (Pont-des-Oulles)	101,5	16 h 34
« »		La Pallud	103	16 h 36
« »		La Paute D 526/ N 91	107,5	16 h 44
N 91		Bourg-d'Oisans	110	16 h 49
« »		Carrefour N 91/ D211	111	16 h 50
D 211		La Garde	114	16 h 56
« »		Le Ribot	116	16 h 59
« »		Huez-en-Oisans	120	17 h 06
« »	(Arrivée)	Alpe-d'Huez-Station (entrée)	122,5	17 h 11

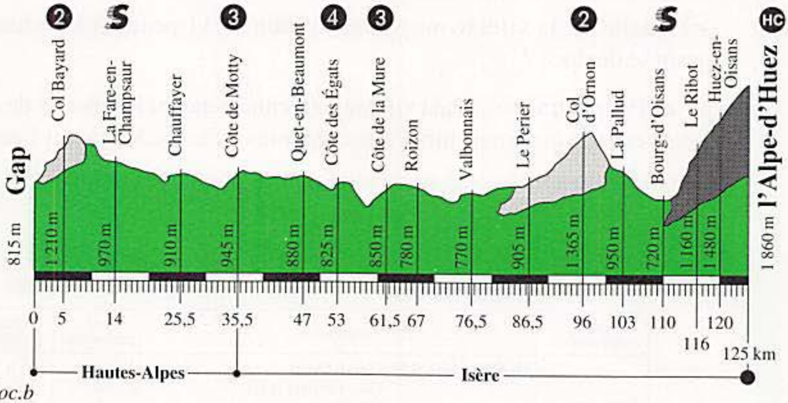
doc.a

En exploitant la description de l'étape Gap - L'Alpe-d'Huez du Tour de France (documents précédent et ci-dessous), répondre aux questions suivantes :

1° Avec quelle vitesse moyenne a été calculé l'horaire probable de déroulement de l'étape ?

2° Calculer les vitesses moyennes prévues pour les coureurs dans les portions de parcours :
0 - 5 km ; 5 - 76,5 km ; 86,5 - 96 km ; 96 - 103 km ; 110 - 122,5 km .

3° En confrontant ces résultats au document *b*, peut-on expliquer l'évolution de la vitesse moyenne sur les différentes portions de parcours considérées ?



doc.b

2.4 Circulation du sang

La vitesse moyenne d'écoulement du sang dans une artère est $v_s = 20\ \text{cm} . \text{s}^{-1}$.

1° Calculer le chemin parcouru par un globule rouge pendant une durée de 4 s .

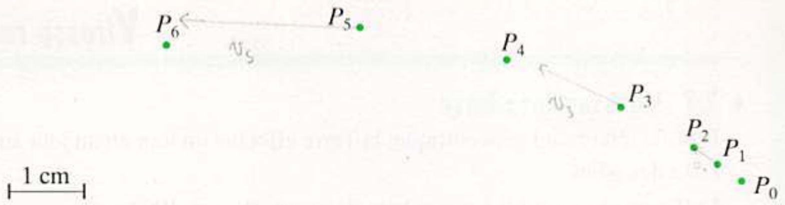
2° En supposant cette vitesse d'écoulement indépendante de la grosseur des artères, quelle est la durée du parcours d'un globule rouge partant du cœur et arrivant au pied d'un individu après un parcours de 1,50 m ?

3° Toujours à cette même vitesse, quelle est la longueur parcourue en un jour par un globule rouge qui effectue le cycle sanguin ?

Vecteur vitesse

2.5 Mouvement d'un palet autoporteur

Au cours d'une expérience, on considère l'enregistrement de positions successivement occupées par un mobile autoporteur. L'intervalle de temps entre deux marquages successifs est $\tau = 40$ ms .



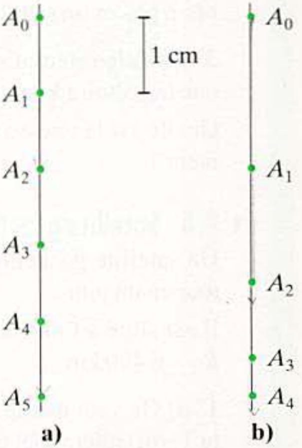
1° Tracer la trajectoire suivie par le mobile entre P_0 et P_6.

2° Calculer les valeurs de la vitesse instantanée du mobile lors des passages en P_1, P_3 et P_5.

3° Quelle est la nature du mouvement de ce mobile ?

4° En prenant pour échelle de représentation 4 cm pour 1 m . s^{-1}, tracer les vecteurs vitesse instantanée $\vec{v}_1$, $\vec{v}_3$ et $\vec{v}_5$.

2.6 Mouvements rectilignes



À partir de l'enregistrement de diverses positions d'un mobile, on a tracé sa trajectoire.

Sur le document, on observe deux trajectoires correspondant à deux mouvements différents.

La période de l'enregistrement est :

$$\tau = 20 \text{ ms}.$$

1° *a*) Quelle est la nature du mouvement correspondant à la trajectoire **a**) ?

b) Justifier la réponse.

c) Représenter, à l'échelle 1 cm ↔ 0,5 m . s^{-1}, les vecteurs vitesse instantanée aux points A_1 et A_4.

2° *a*) Quelle est la nature du mouvement correspondant à la trajectoire **b**) ?

b) Justifier la réponse.

c) Représenter, à la même échelle qu'au **1°** *c*), les vecteurs vitesse instantanée aux points A_1 et A_3.

3° *a*) Calculer la vitesse moyenne sur chacun des intervalles compris entre deux marquages de la trajectoire **b**).

b) Comment varie cette vitesse moyenne ?

♦ 2.7 Vitesses de la Terre

Dans le référentiel géocentrique, la Terre effectue un tour en un jour autour de l'axe des pôles.

La Terre est assimilée à une sphère de rayon $R_T = 6\,400$ km .

1° *a*) Calculer la circonférence de la Terre.

b) Calculer la vitesse moyenne de déplacement d'un point de l'équateur.

c) Même question pour un point situé sur le 45^e parallèle Nord.

2° *a*) Quelles sont les raisons physiques qui peuvent justifier le choix de Kourou, en Guyane, comme centre de lancement de fusées spatiales françaises ?

b) Dans quel sens est-il judicieux d'orienter la trajectoire de la fusée destinée à placer un satellite terrestre en orbite ?

3° Dans le référentiel héliocentrique, le centre de la Terre décrit en un an une trajectoire à peu près circulaire de rayon $R = 150 \,.\, 10^6$ km .

Quelle est la vitesse moyenne du centre de la Terre au cours de ce mouvement ?

♦ 2.8 Satellite géostationnaire

Un satellite géostationnaire effectue, dans le référentiel géocentrique, un tour en un jour.

Il est situé à l'altitude $h = 36\,000$ km , et le rayon moyen de la Terre est $R_T = 6\,400$ km .

1° *a*) On veut que le satellite apparaisse fixe vu d'un point de la surface de la Terre (référentiel terrestre).

Comment doit être choisi le plan de la trajectoire du satellite ?

b) Dans quel sens doit-il se déplacer dans le référentiel géocentrique ?

c) Dessiner en perspective la Terre et le plan de l'orbite du satellite.

2° *a*) Quelle est la vitesse angulaire de la rotation propre de la Terre ?

b) Quelle est la vitesse angulaire du mouvement du satellite géostationnaire autour de la Terre ?

c) Quelle est la vitesse moyenne du satellite sur son orbite ?

3° Sur cette orbite, les divers satellites géostationnaires sont séparés d'environ 800 km .

À quelle durée de parcours cela correspond-il ?

♦ **2.9** Un tapis roulant servant à l'acheminement du gravier travaille à la vitesse linéaire $v = 1{,}5\ \text{m.s}^{-1}$.

Le moteur entraîne le tapis par l'intermédiaire des poulies 1, 2, 3, 4, 5 (*cf.* figure ci-dessous). Il fait tourner la poulie 1 à raison de $1\,440\ \text{tr.min}^{-1}$.

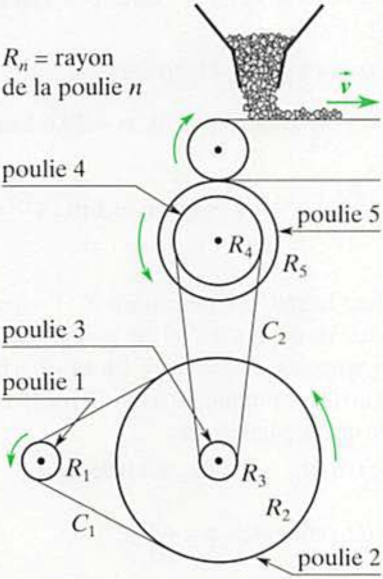
Les poulies 2 et 3 sont coaxiales et solidaires l'une de l'autre. Il en est de même des poulies 4 et 5.

Les poulies 1, 2, 3, 4, 5 ont les diamètres respectifs :

$d_1 = 10$ cm ; $d_2 = 60$ cm ; $d_3 = ?$; $d_4 = 30$ cm ; $d_5 = 35$ cm.

1° Calculer d_3.

2° Calculer les vitesses des deux courroies.


R_n = rayon de la poulie n
$\vec{v}$
poulie 4
poulie 5
R_4
R_5
C_2
poulie 3
poulie 1
R_1
R_3
R_2
C_1
poulie 2

2.1 Par définition, la vitesse moyenne est donnée par la relation $v=\dfrac{L}{\Delta t}$, avec L en mètre (m), Δt en seconde (s) et v en mètre par seconde ($\mathrm{m\,.\,s^{-1}}$). D'autre part, $1\ \mathrm{m\,.\,s^{-1}} = 3{,}6\ \mathrm{km\,.\,h^{-1}}$.

1° $v=\dfrac{L}{\Delta t}=\dfrac{60}{7{,}5}=8$, soit $\mathbf{v = 8\ m\,.\,s^{-1} \approx 28{,}8\ km\,.\,h^{-1}}$.

2° $\Delta t = 13\ \mathrm{h}\ 15 - 11\ \mathrm{h} = 2\ \mathrm{h}\ 15 = 2{,}25\ \mathrm{h}$,

d'où $v=\dfrac{L}{\Delta t}=\dfrac{1\,700}{2{,}25}=755{,}55$, soit $\mathbf{v \approx 756\ km\,.\,h^{-1} \approx 210\ m\,.\,s^{-1}}$.

3° $\Delta t = 16\ \mathrm{h}\ 50 - 13\ \mathrm{h}\ 30 = 3\ \mathrm{h}\ 20 = 3{,}33\ \mathrm{h}$,

d'où $v=\dfrac{L}{\Delta t}=\dfrac{132}{3{,}33}=39{,}64$, soit $\mathbf{v \approx 39{,}6\ km\,.\,h^{-1} \approx 11{,}0\ m\,.\,s^{-1}}$.

4° $v=\dfrac{L}{\Delta t}=\dfrac{0{,}01}{10\,.\,10^{-3}}=1$, soit $\mathbf{v = 1\ m\,.\,s^{-1} = 3{,}6\ km\,.\,h^{-1}}$.

2.2 1° *a*) Pour la SNCF, l'indication $X\,.\,Y$ signifie X heures Y minutes.
Relevons la date de départ 0 h 09, et la date d'arrivée 1 h 15.
La durée du voyage est donc : $\Delta t = 1\ \mathrm{h}\ 15 - 0\ \mathrm{h}\ 09 = 1\ \mathrm{h}\ 06$.
Le train s'est arrêté 1 minute (0 h 44 – 0 h 43) en gare de Mantes-la-Jolie ; donc, la durée de circulation est :
$\Delta t_c = 1\ \mathrm{h}\ 06 - 0\ \mathrm{h}\ 01$, soit $\mathbf{\Delta t_c = 1\ h\ 05\ min}$.

b) La vitesse moyenne est : $v=\dfrac{L}{\Delta t_c}$,

d'où $v=\dfrac{108}{65/60}=99{,}69$, soit $\mathbf{v \approx 99{,}7\ km\,.\,h^{-1}}$.

2° *a*) Calculons la durée totale du voyage : $\Delta t_v = 3\ \mathrm{h}\ 18 - 0\ \mathrm{h}\ 12 = \mathbf{3\ h\ 06}$.

b) Calculons la durée totale des arrêts en gare :
$\Delta t_a = 1+5+1+1+1+1 = 10\ \mathrm{min}$, soit $\mathbf{\Delta t_a = 10\ minutes}$.

c) La durée réelle de déplacement du train est $\Delta t_c = \Delta t_v - \Delta t_a$,

d'où $\Delta t_c = 3\ \mathrm{h}\ 06 - 0\ \mathrm{h}\ 10$, donc $\Delta t_c = 2\ \mathrm{h}\ 56 = 176\ \mathrm{min} = \dfrac{176}{60}\ \mathrm{h}$.

Calculons la vitesse moyenne :

$v=\dfrac{L}{\Delta t_c}=\dfrac{239}{176/60}=81{,}477$, soit $\mathbf{v \approx 81{,}5\ km\,.\,h^{-1}}$.

3° *a*) ▪ Entre Paris et Mantes, $v_1 = \dfrac{L_1}{\Delta t_1} = \dfrac{57}{35/60} = 97{,}7$,

soit $\boldsymbol{v_1 = 97{,}7}$ **km . h⁻¹**.

▪ Entre Mantes et Caen, $v_2 = \dfrac{L_2}{\Delta t_2} = \dfrac{182}{141/60} = 77{,}45$,

soit $\boldsymbol{v_2 \approx 77{,}5}$ **km . h⁻¹**.

b) Pour expliquer que le train circule moins vite dans la deuxième portion, on peut penser que cela est dû aux **nombreux arrêts** qui empêchent de maintenir longtemps l'allure de croisière (**phases d'accélération et de ralentissement**).

2.3 1° Vitesse moyenne probable = $\dfrac{\text{distance à parcourir}}{\text{durée probable}}$.

Distance : 122,5 km ; durée : 17 h 11 – 13 h 35 = 3 h 36,

d'où $v = \dfrac{122{,}5}{216/60} = 34$, soit $\boldsymbol{v \approx 34}$ **km . h⁻¹**.

2°

portion	0 - 5	5 - 76,5	86,5 - 96	96 - 103	110 - 122,5
distance parcourue	5	71,5	9,5	7	12,5
durée (min)	8	127	17	12	22
vitesse (km . h^{-1})	**37,5**	**33,8**	**33,5**	**35,0**	**34,1**

3° On constate que la moyenne ne varie pas trop ; cependant :

- elle est **plus importante entre 96 et 103 (descente)** ;
- elle est **plus faible en montée (86,5 - 96)** et **(110 - 122,5)**, sauf entre 0 et 5 (au départ, les coureurs sont sans doute plus frais !).

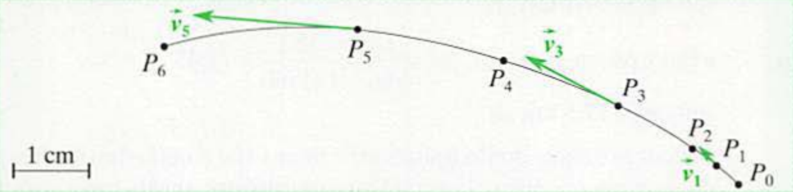
2.4 1° La vitesse est définie par $v = \dfrac{L}{\Delta t}$; donc, le chemin parcouru peut s'écrire $L = v \,.\, \Delta t = 0{,}2 \times 4 = 0{,}8$, soit $\boldsymbol{L = 0{,}8}$ **m**.

2° La durée de parcours s'exprime à partir de la longueur parcourue et de la vitesse par $\Delta t = \dfrac{L}{v} = \dfrac{1{,}5}{0{,}2} = 7{,}5$, soit $\boldsymbol{\Delta t = 7{,}5}$ **s**.

3° Reprenons l'expression du **1°** : $L = v \,.\, \Delta t$, avec $\Delta t = 24 \times 3\,600$ s, d'où $L = 0{,}2 \times 24 \times 3\,600 = 17\,280$, soit $\boldsymbol{L \approx 17\,300}$ **m**.

Un globule rouge parcourt donc, environ, 17 km par jour dans l'appareil circulatoire du corps humain.

2.5 1° Pour tracer la trajectoire, on relie les diverses positions inscrites par une ligne continue et régulière :



2° Pour calculer la vitesse instantanée de passage en un point P_i, on exprime :

$v_i = \dfrac{P_{i-1}P_{i+1}}{2\tau}$.

i	1	3	5
$P_{i-1}P_{i+1}$ (mm)	7	27	45
v_i $(\mathrm{m \cdot s^{-1}})$	**0,088**	**0,34**	**0,56**

3° La trajectoire est courbe et la vitesse varie, **le mouvement est donc curviligne varié** (accéléré puisque v croît).

4° Nous traçons des segments fléchés, tangents à la trajectoire, orientés dans le sens du déplacement (de P_0 à P_6) et de longueurs calculées grâce à l'échelle $1\ \mathrm{m \cdot s^{-1}} \Leftrightarrow 4\ \mathrm{cm}$; donc :

- $L_{\vec{v}_1} = 4 \times 0{,}088 \approx$ **0,35 cm** ;
- $L_{\vec{v}_3} = 4 \times 0{,}34 \approx$ **1,4 cm** ;
- $L_{\vec{v}_5} = 4 \times 0{,}56 \approx$ **2,2 cm** .

2.6 1° *a*) **Mouvement rectiligne uniforme.**

b) Les distances parcourues entre deux marquages successifs sont constantes et égales à 1 cm , et les points sont alignés.

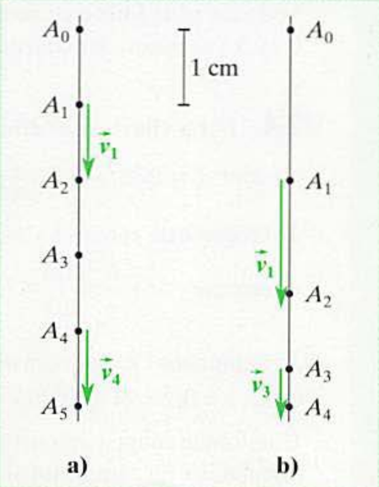
c) La vitesse est constante et vaut :

$v = \dfrac{A_0A_1}{\tau} = \dfrac{A_1A_2}{\tau}$, d'où :

$v = \dfrac{10\ \mathrm{mm}}{20\ \mathrm{ms}} = 0{,}5$,

soit $v = 0{,}5\ \mathrm{mm/ms} = 0{,}5\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

Avec 1 cm pour $0{,}5\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$, le vecteur aura pour longueur 1 cm .



2° *a*) Le mouvement de la trajectoire **b)** correspond à un **mouvement rectiligne varié** (ralenti).

b) Les points correspondant aux diverses positions sont alignés et de plus en plus rapprochés ; le mobile parcourt des distances décroissantes, pendant des intervalles de temps égaux, successifs.

c) • $v_1 = \dfrac{A_0A_2}{2\tau} = \dfrac{35\text{ mm}}{40\text{ ms}} = 0{,}875$, soit $\boldsymbol{v_1 = 0{,}875\ \mathbf{m\,.\,s^{-1}}}$.

Longueur du vecteur : $L_{\vec{v}_1} = \dfrac{0{,}875}{0{,}5} = 1{,}75\text{ cm}$.

• $v_3 = \dfrac{A_2A_4}{2\tau} = \dfrac{14}{40} = 0{,}35$, soit $\boldsymbol{v_3 = 0{,}35\ \mathbf{m\,.\,s^{-1}}}$.

Longueur du vecteur : $L_{\vec{v}_3} = \dfrac{0{,}35}{0{,}5} = 0{,}7\text{ cm}$.

3° *a*) Vitesse moyenne : $v = \dfrac{A_iA_{i+1}}{\tau}$.

d (mm)	$A_0A_1 = 20$	$A_1A_2 = 15$	$A_2A_3 = 10$	$A_3A_4 = 5$
v (m . s^{-1})	**1,00**	**0,75**	**0,50**	**0,25**

b) Cette vitesse moyenne entre deux marquages successifs varie régulièrement : **elle décroît de 0,25 m . s^{-1} pour deux segments consécutifs.**

2.7 **1°** *a*) La circonférence de la Terre est : $C = 2\pi\,.\,R_T$,
d'où $C = 2\pi \times 6\,400 = 40\,212$, soit $\mathbf{C = 40\,212\ km}$.

b) Un point de l'équateur fait un tour en un jour (86 164 s),

d'où $v_e = \dfrac{40\,212\,.\,10^3}{86\,164} = 466{,}7$,

soit $\boldsymbol{v_e = 466{,}7\ \mathbf{m\,.\,s^{-1}} \approx 1\,680\ \mathbf{km\,.\,h^{-1}}}$.

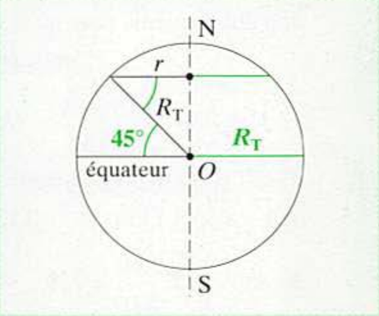
c) Au 45^e parallèle, le rayon de la trajectoire circulaire est donné par :

$r = R_T\,.\cos 45°$.

$v_{45} = \dfrac{2\pi\,.\,r}{86\,164} = \dfrac{2\pi\,.\,R_T\,.\cos 45}{86\,164}$,

$v_{45} = 330\text{ m}\,.\,\text{s}^{-1}$,

soit $\boldsymbol{v_{45} \approx 330\ \mathbf{m\,.\,s^{-1}}}$,
ou $\boldsymbol{v_{45} \approx 1\,190\ \mathbf{km\,.\,h^{-1}}}$.



2° *a*) **La vitesse circonférencielle** d'un point de la Terre dans le référentiel géocentrique **est la plus grande à l'équateur**. On tire profit de cette vitesse pour lancer les fusées spatiales.

b) Il faut lancer la fusée **vers l'est**, car la Terre tourne de l'ouest vers l'est.

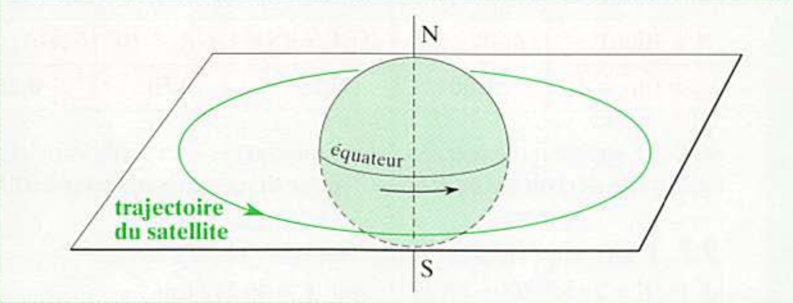
3° $v_T = \dfrac{2\pi \,.\, R}{1 \text{ an}} = \dfrac{2\pi \times 150 \,.\, 10^9}{365{,}25 \times 24 \times 3\,600} = 2{,}99 \,.\, 10^4$,

soit $\boldsymbol{v_T \approx 30 \,.\, 10^3 \text{ m} \,.\, \text{s}^{-1} \approx 108 \,.\, 10^3 \text{ km} \,.\, \text{h}^{-1}}$.

2.8 1° *a*) Il faut, d'une part que la révolution du satellite se fasse autour du même axe que celle de la Terre (mouvement propre), et d'autre part que la trajectoire du satellite soit centrée sur le centre de la Terre : il faut donc une **trajectoire dans un plan équatorial de la Terre**.

b) Dans **le même sens** que la Terre.

c)



2° *a*) $\omega_T = \dfrac{2\pi}{t} = \dfrac{2\pi}{86\,164} = 7{,}29 \,.\, 10^{-5}$,

soit $\boldsymbol{\omega_T \approx 72{,}9 \,.\, 10^{-6} \text{ rad} \,.\, \text{s}^{-1}}$.

b) La vitesse angulaire ω_s du mouvement du satellite autour de la Terre doit être la même pour qu'il y ait immobilité relative :

$$\boldsymbol{\omega_s = \omega_T = 72{,}9 \,.\, 10^{-6} \text{ rad} \,.\, \text{s}^{-1}}.$$

c) $v_s = \dfrac{L}{\Delta t} = \dfrac{2\pi(R_T + h)}{86\,164} = (R_T + h) \,.\, \omega_T$,

d'où $v_s = (36\,000 + 6\,400) \,.\, 10^3 \times 72{,}9 \,.\, 10^{-6} = 3{,}091 \,.\, 10^3$,

soit $v_s \approx 3{,}1 \text{ km} \,.\, \text{s}^{-1} \approx \boldsymbol{11{,}1 \,.\, 10^3 \text{ km} \,.\, \text{h}^{-1}}$.

3° $\Delta t = \dfrac{L}{v_s} = \dfrac{800}{3{,}09} = 259$, soit $\boldsymbol{\Delta t \approx 259 \text{ s} \approx 4{,}3 \text{ minutes}}$.

2.9 1° Remarquons que les courroies ne glissant pas sur les poulies, les poulies reliées par une courroie auront la même vitesse circonférencielle, égale par ailleurs à la vitesse de la courroie. En revanche, les poulies solidaires, telles que 2, 3 et 4, 5 auront la même vitesse angulaire.

- La vitesse circonférencielle v_1 de la poulie 1 est donnée par :

$$v_1 = \omega_1 . R_1 , \text{ avec } R_1 = \frac{d_1}{2} \text{ et } \omega_1 = 1\,440 \text{ tr . min}^{-1} .$$

- Cette vitesse est la vitesse circonférencielle de la poulie 2 dont la vitesse angulaire ω_2 est donnée par :

$$v_1 = v_2 = \omega_2 . R_2 , \text{ d'où } \omega_1 . R_1 = \omega_2 . R_2 , \text{ soit } \omega_2 = \omega_1 . \frac{R_1}{R_2} .$$

- La poulie 3 tourne avec la vitesse angulaire $\omega_3 = \omega_2$; sa vitesse circonférencielle est donc égale à :

$$v_3 = \omega_2 . R_3 = \omega_1 . \frac{R_1}{R_2} . R_3 .$$

- Cette vitesse est celle de la deuxième courroie, c'est-à-dire la vitesse circonférencielle de la poulie 4 qui va tourner avec la vitesse angulaire ω_4 :

$$v_3 = v_4 = \omega_4 . R_4 , \text{ d'où } \omega_1 . \frac{R_1}{R_2} . R_3 = \omega_4 . R_4 , \text{ soit } \omega_4 = \omega_1 . \frac{R_1 . R_3}{R_2 . R_4} .$$

- Cette vitesse angulaire est celle de la poulie 5 dont la vitesse circonférencielle sera donnée par :

$$v_5 = \omega_1 . \frac{R_1 . R_3}{R_2 . R_4} . R_5 , \text{ qui est la vitesse } v \text{ du tapis roulant :}$$

$$v = \omega_1 . \frac{R_1 . R_3}{R_2 . R_4} . R_5 = \frac{\omega_1}{2} . \frac{d_1 . d_3 . d_5}{d_2 . d_4} .$$

- Le diamètre d_3 doit donc être égal à :

$$d_3 = \frac{2v}{\omega_1} . \frac{d_2 . d_4}{d_1 . d_5} .$$

Application numérique :

Nous avons $v = 1{,}5 \text{ m . s}^{-1}$ et $\omega_1 = 1\,440 \text{ tr . min}^{-1}$,

c'est-à-dire $\omega_1 = \dfrac{2\pi \times 1\,440}{60} = 150{,}8 \text{ rad . s}^{-1}$;

d'où $d_3 = \dfrac{2 \times 1{,}5 \times 0{,}6 \times 0{,}3}{150{,}8 \times 0{,}1 \times 0{,}35} = 0{,}102 \text{ m}$, soit $\mathbf{d_3 = 10{,}2\ cm}$.

2° • La vitesse de la courroie C_1 est égale à v_1 :

$v_1 = \omega_1 \,.\, R_1$, donc $v_1 = 150{,}8 \times 0{,}05 = \mathbf{7{,}5\ m\,.\,s^{-1}}$.

• La vitesse de la courroie C_2 est égale à v_3 :

$v_3 = \omega_1 \,.\, \dfrac{R_1}{R_2} \,.\, R_3$, d'où $v_3 = 150{,}8 \times \dfrac{0{,}05}{0{,}3} \times 0{,}051$,

soit $\boldsymbol{v_3} = \mathbf{1{,}28\ m\,.\,s^{-1}}$.

3

LA FORCE - LES INTERACTIONS

RÉSUMÉ DU COURS

Les actions mécaniques

■ **Effets d'une action mécanique :** une action mécanique peut déformer un objet, le mettre en mouvement ou modifier son mouvement.

■ **Différentes actions mécaniques :**

Les actions mécaniques s'exerçant sur un objet peuvent :

- d'une part, être **réparties** ou **localisées** sur une petite zone de l'objet ;
- d'autre part, être de **contact** ou agir **à distance**.

La force

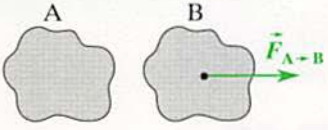
■ Une **action mécanique localisée** exercée par un corps (A) sur un corps (B) peut être modélisée par une force $F_{A \rightarrow B}$ qui présente les quatre caractéristiques :

- direction,
- sens,
- valeur (ou intensité),
- point d'application.

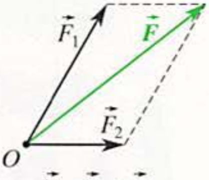
La valeur (ou intensité) d'une force s'exprime en newton (N) ; on la mesure avec un dynamomètre.

■ Le vecteur force :

La force exercée par un corps (A) sur un corps (B) est modélisée par un vecteur $\vec{F}_{A \to B}$ (*cf.* fig. a) qui indique la direction et le sens de l'action mécanique exercée par (A) sur (B). La longueur du vecteur est proportionnelle à l'intensité de la force. **Les forces, grandeurs vectorielles s'ajoutent** (*cf.* fig. b) **ou se décomposent comme les vecteurs** (*cf.* fig. c).

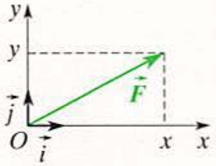


a)



$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$

b)

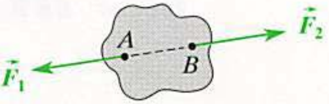


$\vec{F} = x\,\vec{i} + y\,\vec{j}$

c)

■ Équilibre d'un solide soumis à deux forces :

Lorsqu'un solide soumis à deux forces $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ est en équilibre (*cf.* fig. b), alors nécessairement (*cf.* fig. d) :



d)

- les forces ont même support ou même droite d'action ;
- $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{0}$.

■ Exemples de forces :

■ **Les forces de pesanteur**, action de la Terre sur un corps ; ce sont des forces réparties en volume. Elles ont le même effet qu'une force unique $\vec{P}$, poids du corps :

- de direction verticale dirigée vers le bas ;
- appliquée au centre de gravité G du corps ;
- d'intensité $P = m \cdot g$.

(g, l'intensité de la pesanteur, est, en France, environ égale à $9{,}8\ \mathrm{N \cdot kg^{-1}}$.)

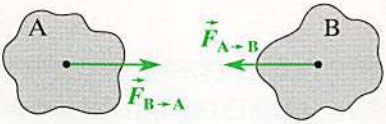
■ **Tension d'un câble** : de poids négligeable, elle a la direction du câble.

■ **Forces pressantes** : elles sont dues aux actions de contact d'un fluide sur une paroi : elles sont perpendiculaires aux parois. La pression p est alors définie par :

$$\boxed{p = \frac{F}{s}}$$

Unités : s est l'aire (en m^2) de la surface perpendiculaire à $\vec{F}$; la pression p s'exprime en pascal (Pa), $1\ \mathrm{bar} = 10^5\ \mathrm{Pa}$.

■ Il y a interaction entre un corps (A) et un corps (B), si (A) exerce sur (B) une force $\vec{F}_{A \rightarrow B}$; alors (B) exerce sur (A) une force $\vec{F}_{B \rightarrow A}$.



■ Principe d'interaction :

Lorsqu'un corps (A) exerce sur un corps (B) une action mécanique caractérisée par une force $\vec{F}_{A \rightarrow B}$, le corps (B) exerce sur (A) une action caractérisée par une force $\vec{F}_{B \rightarrow A}$. Que les corps soient au repos ou en mouvement, ces deux forces sont telles que :

- $\vec{F}_{A \rightarrow B} = -\vec{F}_{B \rightarrow A}$,
- les deux forces ont même droite d'action.

■ Exemples d'interactions :

- Le poids d'un corps est dû à l'interaction entre la Terre et le corps.
- L'action d'un support sur un objet est due à l'interaction entre le support et l'objet posé dessus.
- La tension d'un fil est due à l'interaction entre le fil et le corps qui lui est accroché.

■ Étude d'un système mécanique :

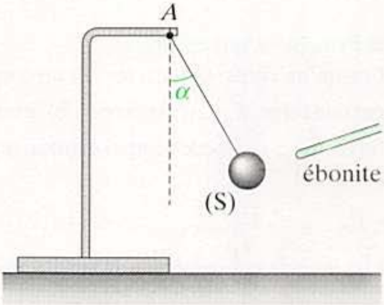
Pour étudier le mouvement ou l'équilibre d'un corps, il est nécessaire de faire l'inventaire des forces qui s'exercent sur lui. Pour cela, il importe :

- de bien délimiter le système mécanique, noté $\{\mathcal{S}\}$;
- de prendre en compte toutes les forces qu'exercent sur $\{\mathcal{S}\}$ les objets qui l'entourent (forces extérieures) ;
- de faire apparaître, s'il y a lieu, les forces qui s'exercent entre les parties du système (forces intérieures).

Le vecteur force

3.1 Représentation et décomposition d'une force

Lorsqu'on approche un bâton d'ébonite électrisé d'une boule de sureau métallisée suspendue à un fil, la boule est soumise à une force $\vec{F}$.



La force $\vec{F}$ a pour caractéristiques :

- une direction faisant un angle de 30° au-dessus de l'horizontale ;
- un sens dirigé vers le bâton d'ébonite ;
- un point d'application au centre de la boule (S) ;
- une valeur $F = 10^{-2}$ N.

1° Représenter le vecteur force $\vec{F}$ à l'échelle 1 cm pour $5 . 10^{-3}$ N.

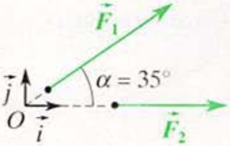
2° *a*) Décomposer la force $\vec{F}$ selon les deux directions Ox et Oy, horizontale et verticale.

b) Calculer la valeur des composantes de la force $\vec{F}$ selon Ox et Oy.

3.2 Somme de deux forces

Deux forces sont représentées sur la figure ci-contre, avec une échelle de représentation telle que :

0,5 cm ↔ 10 N.



1° *a*) Représenter la force :

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

par une construction géométrique.

b) Déterminer, graphiquement, l'intensité F et la direction de cette force : [angle $\beta = (\vec{F}_2, \vec{F})$].

2° Soit un repère $(O\,;\vec{i},\vec{j})$ orthonormé.

a) Calculer les coordonnées de $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ et $\vec{F}$ dans ce repère.

b) Calculer l'intensité de F et l'angle $\beta = (\vec{F}_2, \vec{F})$.

3.3 Forces et effets des forces

1° Un archer, debout sur le sol, tient son arc avec la main gauche et tend la corde en tenant la flèche avec la main droite ; il vise une cible.

a) Quelles sont les actions mécaniques agissant sur le système {archer - arc - flèche} ?

b) Classer ces actions en actions localisées ou actions réparties.

c) Quels sont les effets de chacune de ces actions ?

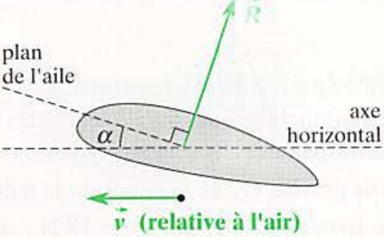
2° L'archer lâche la corde.

a) Quelles sont les forces qui agissent sur la flèche au cours des diverses phases de son mouvement ?

b) Les forces sont-elles localisées ou réparties ?

♦ 3.4 Portance et traînée d'une aile d'avion

Lorsqu'un avion se déplace en vol avec une vitesse $\vec{v}$ relativement à l'air, cet air exerce sur chacune des ailes des actions réparties que l'on peut représenter par une force unique $\vec{R}$, appliquée en un point de l'aile.



1° *a*) Décomposer la force $\vec{R}$ suivant les deux directions horizontale et verticale.

b) Quel est l'effet de chacune de ces composantes ?

c) Laquelle est la traînée $\vec{T}$? Laquelle est la portance $\vec{F}$?

2° *a*) Exprimer littéralement F et T en fonction de R et α.

b) Que deviennent ces expressions lorsque, α étant petit, on peut utiliser les approximations suivantes : $\sin \alpha \approx \alpha$ (rad) et $\cos \alpha \approx 1$?

3° Dans le cas d'une force $R = 2\,000$ N et d'un angle petit, $\alpha = 8°$, calculer la valeur des deux composantes F et T.

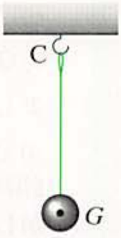
4° On définit la « finesse » de l'aile par le rapport $f = \dfrac{F}{T}$.

Calculer la « finesse » de l'aile considérée.

Équilibre d'un solide soumis à des forces colinéaires

♦ 3.5 Équilibre d'une bille

Une bille en acier, de masse 0,2 kg , est suspendue, par l'intermédiaire d'un fil de masse négligeable, à un crochet fixe (C) .



1° *a*) Effectuer l'inventaire des forces qui s'exercent sur la bille et préciser si ce sont des forces de contact ou à distance.

b) Énoncer la condition d'équilibre de la bille.

c) Calculer la valeur de chacune des forces en présence.

d) Représenter les vecteurs force à l'échelle :

0,5 cm ↔ 1N .

2° *a*) On intercale un dynamomètre entre le fil et le crochet (C) .
Que mesure ce dynamomètre ?

b) On place un aimant au voisinage de la bille et au-dessous ; le fil de suspension reste vertical et le dynamomètre indique alors 2,2 N .
Représenter, à la même échelle qu'en **1°** *d*), les vecteurs force en présence.

♦♦ 3.6 Équilibre de deux livres superposés

Deux livres assimilables à des parallélépipèdes homogènes sont superposés sur une table horizontale. Ils sont en équilibre.
Les centres de gravité G_1 et G_2 sont sur la même verticale.
Le poids du livre de dessus est $P_2 = 18$ N , celui du livre de dessous est $P_1 = 10$ N .

1° *a*) Faire un schéma comportant la table et les deux livres.

b) Quelles sont les forces agissant sur chacun des livres ?

2° *a*) Calculer les valeurs des forces inconnues, en énonçant les lois utilisées pour y parvenir.

b) Représenter, à l'échelle 1 cm ↔ 20 N , les forces s'exerçant sur chaque livre.

3° On considère, maintenant, le système {livre 1 - livre 2}.

a) Effectuer l'inventaire des forces extérieures au système.

b) Donner les valeurs de ces forces.

c) Quelle est la valeur de la force exercée sur la table par le système {livre 1 - livre 2} ?

♦♦ 3.7 Solide accroché à un ressort

À l'extrémité A d'un ressort (R), on suspend un solide (S) de poids $P = 10\ \text{N}$; l'autre extrémité B du ressort est retenue par une main (M). Le ressort est de poids négligeable.

1° On considère le système {ressort - solide} immobile.

a) Faire un bilan des forces extérieures qui s'exercent sur ce système.

b) Énoncer la condition d'équilibre du système.

c) Déterminer et représenter les forces $\vec{F}_{M \to R}$ et $\vec{F}_{R \to M}$.

2° Le système considéré est maintenant le solide (S) immobile à l'équilibre.

a) Déterminer et représenter les forces $\vec{F}_{R \to S}$ et $\vec{F}_{S \to R}$.

b) À l'équilibre, comparer $\vec{F}_{S \to R}$ et $\vec{F}_{M \to R}$.

c) Peut-on trouver directement la relation entre ces deux forces ?

× **3°** On bouge la main afin que le solide oscille verticalement.

a) La valeur de la force $\vec{F}_{R \to S}$ est-elle toujours égale au poids ? Justifier votre affirmation.

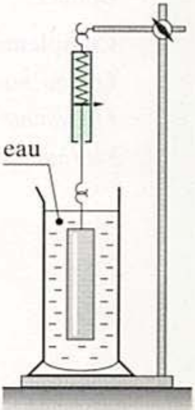
b) A-t-on encore l'égalité $\vec{F}_{S \to R} = -\vec{F}_{R \to S}$?

♦ 3.8 Poussée d'Archimède

Complément nécessaire : la poussée d'Archimède

Tout corps plongé dans un liquide est soumis à des forces pressantes équivalant à une force unique $\vec{\pi}$ *:*

- *de droite d'action verticale ;*
- *de sens dirigé vers le haut ;*
- *de valeur égale au poids du volume déplacé (volume dont le solide a pris la place) ;*
- *de point d'application, le centre de poussée situé au centre de gravité du volume d'eau déplacé.*



Un cylindre en aluminium de hauteur $h = 20\ \text{cm}$, de diamètre $D = 2\ \text{cm}$, est suspendu à un dynamomètre. La masse volumique de l'aluminium est $2{,}7\ \text{g} . \text{cm}^{-3}$. On néglige la poussée d'Archimède due à l'air.

Le centre de gravité G du cylindre est son centre de symétrie.

Donnée : $g = 9{,}81\ \text{N} . \text{kg}^{-1}$.

1° À l'équilibre, qu'indique le dynamomètre ?

2° On plonge le cylindre complètement dans de l'eau de masse volumique $\rho_{\text{eau}} = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

a) Faire un schéma de l'expérience.

b) Faire un bilan des forces extérieures qui s'exercent sur le cylindre à l'équilibre.

c) Déterminer la valeur de la poussée d'Archimède ; en déduire la valeur de la force mesurée par le dynamomètre.

d) Représenter les forces suivantes à l'échelle 1 cm ↔ 0,5 N :

- l'action du dynamomètre sur le cylindre ;
- la poussée d'Archimède ;
- l'action du cylindre sur l'eau.

Équilibre d'un solide soumis à trois forces

♦♦ 3.9 Équilibre d'un objet électrisé

Un petit objet (S) de masse m, suspendu à l'extrémité d'un fil, est attiré par une règle de plexiglas électrisée. La force attractive exercée à distance par la règle sur l'objet (S) est horizontale.
L'objet adopte alors une position d'équilibre telle que le fil fait un angle α avec la verticale.

1° Faire le bilan des forces appliquées à l'objet (S).

2° Déterminer la valeur de l'angle α.

3° Calculer la tension du fil.

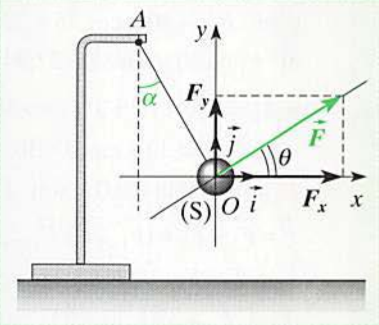
Données : $m = 0{,}5 \text{ g}$; $F = 3 \cdot 10^{-3} \text{ N}$; $g \approx 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Complément nécessaire

Lorsqu'un solide soumis à trois forces est en équilibre, nécessairement :

- *la somme vectorielle de ces forces est nulle ;*
- *les supports de ces forces sont coplanaires et concourants.*

CORRIGÉS DES EXERCICES



3.1 1° Le vecteur $\vec{F}$ aura pour caractéristiques :

- une direction faisant un angle $\theta = 30°$ avec l'horizontale ;
- un point d'application au centre O de (S) ;
- un sens vers la droite et vers le haut ;
- une longueur :

$$L_{\vec{F}} = \frac{10^{-2}\,(\mathrm{N})}{5\,.\,10^{-3}\,(\mathrm{N\,.\,cm^{-1}})} = 2\,, \quad \text{soit} \quad L_{\vec{F}} = 2\ \mathrm{cm}\,.$$

2° *a*) Représentons, à partir du centre O de la boule (S), le système d'axes orthonormés (Ox, Oy).

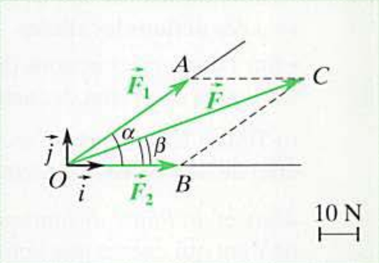
Projetons, orthogonalement à ces axes, le vecteur $\vec{F}$; nous obtenons sur les axes deux projections, $\boldsymbol{F_x}$ **et** $\boldsymbol{F_y}$.

b) • Sur l'axe Ox :

$F_x = F\,.\cos\theta = 10^{-2} \times \cos 30° = 10^{-2} \times 0{,}866$, soit $\boldsymbol{F_x \approx 8{,}7\,.\,10^{-3}\ \mathrm{N}}$.

• Sur l'axe Oy :

$F_y = F\,.\sin\theta = 10^{-2} \times \sin 30° = 10^{-2} \times 0{,}5$, soit $\boldsymbol{F_y = 5\,.\,10^{-3}\ \mathrm{N}}$.



3.2 1° *a*) Sur chacune des directions (des vecteurs $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$), et à partir de leur point d'intersection O, reportons au compas respectivement les longueurs $L_{\vec{F_1}}$ et $L_{\vec{F_2}}$.

Soient A et B les points obtenus par intersection avec les deux directions.

À partir de A, traçons un arc de cercle de rayon $L_{\vec{F_2}} = 1{,}5$ cm, et à partir de B un arc de cercle de rayon $L_{\vec{F_1}} = 2$ cm ; leur point d'intersection C détermine avec O, A et B un parallélogramme de diagonale OC.

Le vecteur $\overrightarrow{OC}$, représentant de $\vec{F}$, est la somme de $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$.

b) En mesurant au rapporteur, on trouve : $\boldsymbol{\beta = 20°}$.

En mesurant au double décimètre, on trouve : $L_{\vec{F}} \approx 3{,}35$ cm, soit $\boldsymbol{F \approx 67\ \mathrm{N}}$.

2° *a*) ■ $\vec{F}_1 = F_{1x}\,.\,\vec{i} + F_{1y}\,.\,\vec{j}$, avec $F_{1x} = F_1\,.\cos\alpha$ et $F_{1y} = F_1\,.\sin\alpha$.

$F_1 = L_{\vec{F}_1} \times 10 = 4 \times 10 = 40\ \text{N}$,

d'où $F_{1x} = 40 \times \cos 35 \approx 32{,}765$, soit $\boldsymbol{F_{1x} \approx 33\ \text{N}}$;

et $F_{1y} = 40 \times \sin 35 = 22{,}94$, soit $\boldsymbol{F_{1y} \approx 23\ \text{N}}$;

■ $F_2 = L_{\vec{F}_2} \times 10 = 3 \times 10 = 30\ \text{N}$,

d'où $F_{2x} = 30 \times \cos 0 = 30$, soit $\boldsymbol{F_{2x} = 30\ \text{N}}$.

$F_{2y} = 30 \times \sin 0 = 0$, soit $\boldsymbol{F_{2y} = 0\ \text{N}}$.

$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = (\vec{F}_{1x}\,.\,\vec{i} + \vec{F}_{1y}\,.\,\vec{j}) + (\vec{F}_{2x}\,.\,\vec{i} + \vec{F}_{2y}\,.\,\vec{j})$,

soit $\vec{F} = F_x\,.\,\vec{i} + F_y\,.\,\vec{j}$, avec $F_x = F_{1x} + F_{2x}$ et $F_y = F_{1y} + F_{2y}$,

d'où $F_x = 33 + 30 = 63$, soit $\boldsymbol{F_x = 63\ \text{N}}$;

d'où $F_y = 23 + 0 = 23$, soit $\boldsymbol{F_y = 23\ \text{N}}$.

b) $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{63^2 + 23^2} = 67$, soit $\boldsymbol{F \approx 67\ \text{N}}$.

$\cos\beta = \dfrac{F_x}{F} = \dfrac{63}{67} = 0{,}94$, d'où $\boldsymbol{\beta = 20°}$.

3.3 1° *a*) et *b*) :

• Sur les trois parties du système, l'action de la pesanteur s'exerce (attraction terrestre) : ce sont des **actions réparties**.

• Sur l'arc, les actions de la main gauche et de la main droite sont des **actions localisées**.

• Sur la flèche, l'action de la main droite et les actions de contact avec l'arc sont des **actions localisées**.

• Sur l'archer, les actions de l'arc sur chacune des mains et les actions du sol sur les pieds sont des **actions localisées**.

c) Toutes les actions citées, à l'exception de l'attraction terrestre, ont pour effet de **déformer le système**.

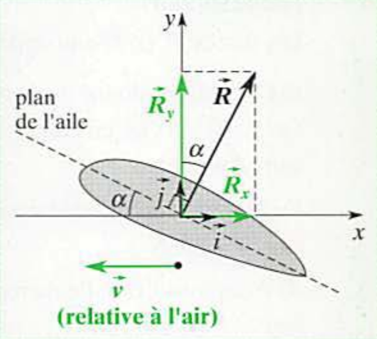
2° *a*) et *b*) *Phase de lancement* : la flèche est alors en contact avec la corde de l'arc qui exerce une action mécanique localisée, représentable par une force localisée à l'extrémité de la flèche.
La flèche est soumise à son poids de valeur négligeable. C'est une **action répartie** que l'on peut représenter par une **force localisée** au centre de gravité.

Phase de vol : toujours soumise à son poids, la flèche est soumise à une action mécanique due aux frottements de l'air : cette **action délocalisée** peut être représentée par une force de frottement.

Phase de contact avec la cible : la flèche est soumise à une force exercée par la cible dans laquelle elle pénètre : cette force est localisée sur la pointe de la flèche.

3.4 1° *a*) *Cf.* le schéma ci-contre.
Projetons orthogonalement l'extrémité du vecteur $\vec{R}$ sur chacun des deux axes Ox et Oy : nous obtenons deux composantes R_x et R_y telles que : $\vec{R} = R_x . \vec{i} + R_y . \vec{j}$.

b) La composante $\vec{R}_x$ **s'oppose à l'avancement de l'avion**.
La composante $\vec{R}_y$ **s'oppose à la perte d'altitude de l'avion**.



c) La composante $\vec{R}_x$ **est la traînée** $\vec{T}$ qu'il faut vaincre pour avancer. La composante $\vec{R}_y$ **est la portance** $\vec{F}$ qui tend à maintenir l'avion en l'air.

2° *a*) Sur la figure, on retrouve l'angle α entre $\vec{R}$ et Oy (angles à côtés perpendiculaires) ; il s'ensuit que :
$R_y = F = R . \cos\alpha$, d'où $\boldsymbol{F = R . \cos\alpha}$;
$R_x = T = R . \sin\alpha$, d'où $\boldsymbol{T = R . \sin\alpha}$.

b) Avec α (en radians) petit, nous obtenons :
$F = R . \cos\alpha \approx R$, d'où $\boldsymbol{F \approx R}$.
$T = R . \sin\alpha \approx R . \alpha$, d'où $\boldsymbol{T \approx R . \alpha}$, avec α(rad).

3° Avec $R = 2\,000$ N et $\alpha = 8°$, soit, en radian, $\alpha = \dfrac{8 \times \pi}{180} = 0{,}139\,6$,

on a $\boldsymbol{F \approx R \approx 2\,000}$ **N**, soit $\boldsymbol{F \approx 2\,000}$ **N**,

et $T \approx R . \alpha \approx 2\,000 \times 0{,}14 \approx 280$, soit $\boldsymbol{T \approx 280}$ **N**.

4° La « finesse » de cette aile vaut : $f = \dfrac{F}{T} \approx \dfrac{2\,000}{280} = 7{,}14$, soit $f \approx \mathbf{7{,}1}$.

3.5 1° *a*) Inventaire des forces s'exerçant sur le système {bille} :
- Le **poids** $\vec{P}$ de la bille dû à l'attraction terrestre ; c'est une action à distance et répartie, représentée par une force unique $\vec{P} = m . \vec{g}$ appliquée au centre de gravité G de la bille.

- La **tension** $\vec{T}$ du fil de suspension, qui représente une action localisée au point d'attache : **force de contact**.

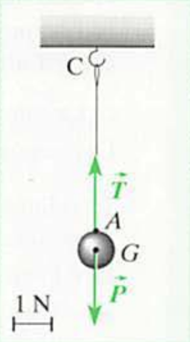
b) Un corps soumis à deux forces est en équilibre **lorsque la somme de ces deux forces est nulle** : $\vec{P}+\vec{T}=\vec{0}$, **et lorsque ces deux forces ont un même support**.
Les forces $\vec{P}$ et $\vec{T}$ sont opposées : $\vec{P}=-\vec{T}$.

c) Le poids est donné par la relation $\vec{P}=m\,.\,\vec{\mathrm{g}}$.
Or $\mathrm{g}=9{,}8\ \mathrm{N\,.\,kg}$ en France, donc le poids vaut : $P=m\,.\,\mathrm{g}=0{,}2\times 9{,}8=1{,}96$, soit $\boldsymbol{P\approx 2{,}0\ \mathrm{N}}$.
De l'équilibre, nous déduisons $\vec{P}=-\vec{T}$, d'où $T=P$, soit $\boldsymbol{T\approx 2{,}0\ \mathrm{N}}$.

d) Adoptons l'échelle de représentation des vecteurs force : $0{,}5\ \mathrm{cm}\leftrightarrow 1\ \mathrm{N}$.
Chaque vecteur aura même longueur :

$$L_P=L_T=0{,}5\ \mathrm{cm}\times 1{,}96\approx 1\ \mathrm{cm}.$$

La tension sera représentée par un vecteur $\vec{T}$ vertical, ascendant, appliqué au point de contact A entre le fil et la bille.



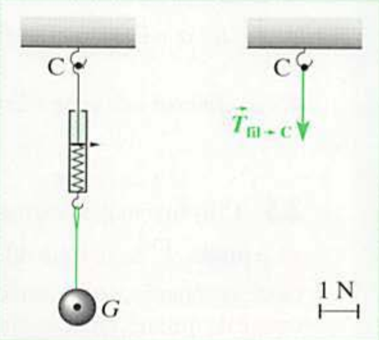
2° *a*) Le dynamomètre placé entre le crochet (C) et l'extrémité supérieure du fil **mesure la valeur de la force exercée par le fil sur le crochet (C)** : $T_{\mathrm{fil}\to\mathrm{C}}$.
Le fil étant de masse négligeable, cette force représente la tension du fil, la même en tout point du fil.
L'indication du dynamomètre est donc de **1,96 N**.

b) Le dynamomètre mesure la valeur de la tension du fil qui est maintenant égale à $T=2{,}2\ \mathrm{N}$.

Inventaire des forces :

- le poids $\vec{P}$ vertical ;
- la force magnétique $\vec{F}$ verticale puisque le fil demeure vertical ;
- la tension $\vec{T}$ verticale.

La bille étant en équilibre :
$\vec{T}+\vec{P}+\vec{F}=\vec{0}$, d'où $\vec{T}=-(\vec{P}+\vec{F})$.
La valeur de la tension $\vec{T}$ ayant augmenté, la force $\vec{F}$ est dirigée vers le bas, comme $\vec{P}$.



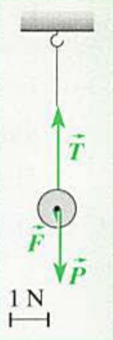
Donc $T = P + F$, car $\vec{P}$ et $\vec{F}$ ont même direction et même sens ;
d'où $F = T - P = 2{,}2 - 2{,}0$, soit $F = 0{,}2\ \text{N}$.

Représentation des vecteurs force :

$\vec{T}$: vecteur vertical dirigé vers le haut, de longueur **1,1 cm** ;

$\vec{P}$: vecteur vertical dirigé vers le bas, de longueur **1,0 cm** ;

$\vec{F}$: vecteur vertical dirigé vers le bas, de longueur **0,1 cm**.



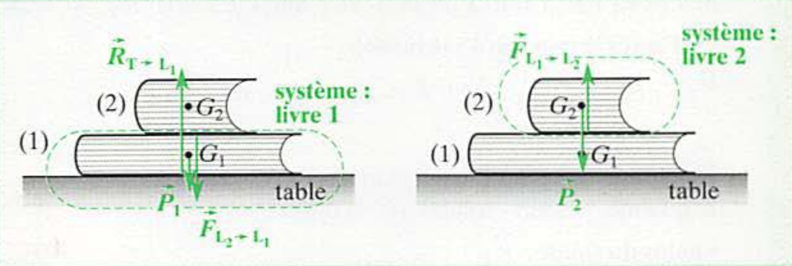
3.6 **1°** *a*) Voir l'ensemble {table - livres} des figures ci-dessous.

b) ■ Sur le livre L_1 s'exerçent :

- **son propre poids** $\vec{P}_1$ (dû à l'attraction terrestre) ;
- **l'action de contact due au livre** L_2 : $\vec{F}_{L_2 \to L_1}$;
- **l'action de contact due à la table** : $\vec{R}_{T \to L_1}$.

■ Sur le livre L_2 s'exerçent :

- **son propre poids** $\vec{P}_2$ (dû à l'attraction terrestre) ;
- **l'action de contact due au livre** L_1 : $\vec{F}_{L_1 \to L_2}$.



2° *a*) ■ Considérons d'abord le système {livre L_2} : il est en équilibre sous l'action de deux forces ; la somme de ces deux forces est donc nulle :

$\vec{P}_2 + \vec{F}_{L_1 \to L_2} = \vec{0}$, et elles ont même support.
D'où $F_{L_1 \to L_2} = P_2 = 18\ \text{N}$, soit $\boldsymbol{F_{L_1 \to L_2} = 18\ \text{N}}$.

■ Considérons le système {livre L_1} : il est en équilibre sous l'action de trois forces, dont deux verticales descendantes, $\vec{P}_1$ et $\vec{F}_{L_2 \to L_1}$, pouvant être ramenées à une seule, $\vec{P}_t$.
Le principe d'interaction entre {L_1} et {L_2} permet d'écrire :

$$\vec{F}_{L_2 \to L_1} = -\vec{F}_{L_1 \to L_2}, \quad \text{soit} \quad \boldsymbol{F_{L_2 \to L_1} = P_2 = 18\ \text{N}}.$$

La force verticale descendante $P_t = P_1 + F_{L_2 \to L_1} = 18 + 10$, soit $\boldsymbol{P_t = 28\ N}$.

Le système $\{L_1\}$ étant en équilibre, $\vec{P_t} + \vec{R}_{T \to L_1} = \vec{0}$,

d'où $\vec{R}_{T \to L_1} = -\vec{P_t}$ et $R_{T \to L_1} = P_t = 28$, soit $\boldsymbol{R_{T \to L_1} = 28\ N}$.

b) Utilisons l'échelle de représentation : 1 cm ↔ 20 N :

- longueur de $\vec{P}_1$: $\dfrac{1}{20} \times 10 = 0{,}5$ cm ;
- longueur de $\vec{P}_2$: $\dfrac{1}{20} \times 18 = 0{,}9$ cm ;
- longueur de $\vec{F}_{L_1 \to L_2}$: $\dfrac{1}{20} \times 18 = 0{,}9$ cm ;
- longueur de $\vec{R}_{T \to L_1}$: $\dfrac{1}{20} \times 28 = 1{,}4$ cm .

On en déduit les représentations des forces s'exerçant sur chaque livre (*cf.* la figure du **1°** *b*).

3° *a*) Inventaire des forces extérieures s'exerçant sur le système {livre 1 - livre 2} :

- **attraction terrestre** : poids total $\vec{P_t}$;
- **action de la table sur le livre $\mathbf{L_1}$** : $\vec{R}_{T \to L_1}$.

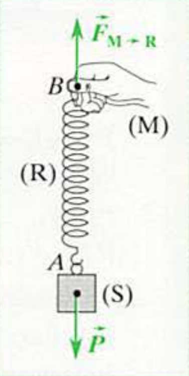
b) $\vec{P_t} = \vec{P}_1 + \vec{P}_2$, soit $\boldsymbol{P_t = 28\ N}$ et, d'après le **2°** *a*) : $\boldsymbol{R_{T \to L_1} = 28\ N}$.

c) D'après le principe d'interaction :

$\vec{R}_{T \to L_1} = -\vec{R}_{L_1 \to T}$, soit $R_{T \to L_1} = \boldsymbol{R_{L_1 \to T} = 28\ N}$.

3.7 1° *a*) Bilan des forces extérieures s'exerçant sur le système {ressort - solide} (*cf.* la figure ci-contre) :

- **poids du solide** : $\vec{P}$;
- **action exercée en B par la main (M)** : $\vec{F}_{M \to R}$.



b) Le système soumis à deux forces est en équilibre **lorsque la somme des forces est nulle** :

$$\vec{P} + \vec{F}_{M \to R} = \vec{0}.$$

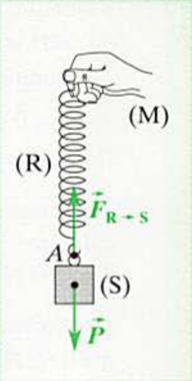
c) • De la relation précédente, il vient :

$$\vec{F}_{M \to R} = -\vec{P}, \text{ soit } \boldsymbol{F_{M \to R} = P = 10\ N}.$$

• Le principe d'interaction appliqué au point B permet d'écrire :

$$\vec{F}_{M \to R} = -\vec{F}_{R \to M}, \text{ soit } \boldsymbol{F_{R \to M} = F_{M \to R} = 10\ N}.$$

2° *a*) Le solide $\{S\}$ est soumis à deux forces : son poids $\vec{P}$ et l'action du ressort en A, $\vec{F}_{R \to S}$.



Le système étant en équilibre, $\boldsymbol{F_{R \to S} = P = 10\ N}$.

D'après le principe d'interaction appliqué au point A :

$$\vec{F}_{S \to R} = -\vec{F}_{R \to S}, \text{ soit } \boldsymbol{F_{S \to R} = P = 10\ N}.$$

b) On constate qu'à l'équilibre, $\vec{F}_{S \to R} = -\vec{F}_{M \to R}$.

c) **Ceci résulte de l'équilibre du système $\{R\}$** dont le poids est négligeable.

3° *a*) La valeur de la force $\vec{F}_{R \to S}$ **diffère du poids** car le solide (S) n'est plus en équilibre :

- $F_{R \to S} > P$ si le ressort est plus allongé ;
- $F_{R \to S} < P$ si le ressort est moins allongé.

b) On a toujours $\vec{F}_{S \to R} = -\vec{F}_{R \to S}$, car le principe d'interaction est valable à l'équilibre ou pendant la phase de mouvement.

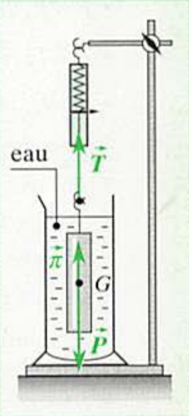
3.8 1° Le dynamomètre **mesure la valeur de la force exercée sur son extrémité libre**. Le système étant en équilibre, cette force est égale au poids P du cylindre :

$$P = m \,.\, g = \rho \,.\, \pi \,.\, \frac{D^2}{4} \,.\, h \,.\, g.$$

Or $\rho = 2{,}7\ g \,.\, cm^{-3} = 2\,700\ kg \,.\, m^{-3}$,

d'où $P = 2\,700 \times \pi \times \dfrac{(2 \,.\, 10^{-2})^2}{4} \times 0{,}2 \times 9{,}81 = 1{,}66$, soit $\boldsymbol{P = 1{,}66\ N}$.

2° *a*) *Cf.* la figure ci-contre.



b) Étudions le système {cylindre} ; il est soumis :

- à son **poids** $\vec{P}$, vertical descendant ;
- à la **poussée d'Archimède** $\vec{\pi}$, verticale ascendante ;
- à la **force** $\vec{T}$ exercée par le ressort, verticale ascendante.

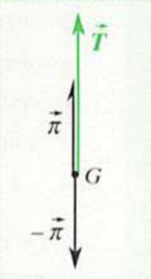
c) $\pi = \rho_{eau} \,.\, v \,.\, g$,

soit $\pi = \rho_{eau} \,.\, \pi \,.\, \dfrac{D^2}{4} \,.\, h \,.\, g$,

avec $\rho_{eau} = 10^3\ kg \,.\, m^{-3}$,

d'où $\pi = 0{,}616$, soit $\boldsymbol{\pi \approx 0{,}62\ N}$.

À l'équilibre, l'ensemble des deux forces $\vec{P}$ et $\vec{\pi}$ s'identifie à une force unique $\vec{P_t}$, verticale et dirigée vers le bas, car $P > \pi$, de valeur $P_t = P - \pi$.
La condition d'équilibre du cylindre s'écrit :
$\vec{P_t} + \vec{T} = \vec{0}$, soit $\vec{T} = -\vec{P_t}$, d'où $T = P_t = P - \pi$.
Donc $T = 1{,}66 - 0{,}62 = 1{,}04$, soit $\mathbf{T = 1{,}04\ N}$.

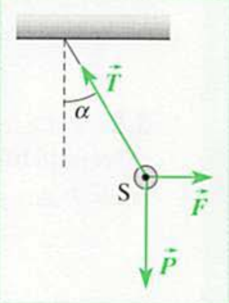


d) $\vec{T}$ représente l'action du dynamomètre sur le cylindre :
$T = 1{,}04$ N, d'où $L_T = 1{,}04 \times 2 \approx 2{,}1$ cm.

$\vec{\pi}$ représente la poussée d'Archimède :
$\pi = 0{,}62$ N, d'où $L_\pi = 0{,}62 \times 2 \approx 1{,}25$ cm.

$-\vec{\pi}$ représente l'action du cylindre sur l'eau, d'où $L_{-\pi} \approx 1{,}25$ cm.

3.9 1° L'objet est soumis à trois forces :
- son **poids** $\vec{P}$,
- la **tension** $\vec{T}$ du fil (dirigée comme le fil tendu),
- la **force** $\vec{F}$, horizontale, exercée à distance par la règle électrisée.



Ces forces sont toutes trois localisées en (S) : l'objet, de petite dimension, est assimilé à un point matériel.

2° À l'équilibre, $\vec{P} + \vec{T} + \vec{F} = \vec{0}$.
Adoptons un repère orthonormé $(S\,;\vec{i}, \vec{j})$ du plan contenant les trois forces.
- $\vec{P} = P_x.\vec{i} + P_y.\vec{j} = -P.\vec{j}$.
- $\vec{T} = T_x.\vec{i} + T_y.\vec{j} = -T.\sin\alpha.\vec{i} + T.\cos\alpha.\vec{j}$.
- $\vec{F} = F_x.\vec{i} + F_y.\vec{j} = F.\vec{i}$.

Si la somme vectorielle est nulle, la somme algébrique des coordonnées :
- sur l'axe $(y'y)$ est nulle :

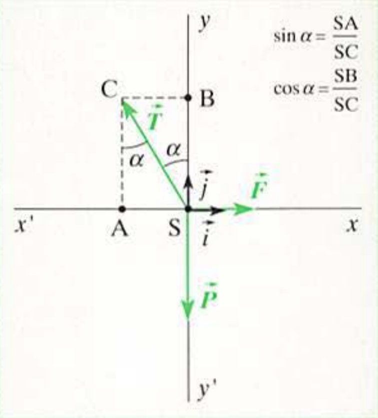
$P_x + T_x + F_x = 0 - T.\sin\alpha + F = 0\,;$ (1)
- sur l'axe $(x'x)$ est nulle :

$P_y + T_y + F_y = -P + T.\cos\alpha + 0 = 0.$ (2)

Les relations (1) et (2) donnent :
$T.\sin\alpha = F\,;$ (1')
$T.\cos\alpha = P.$ (2')

Le quotient, membre à membre, donne :

$$\frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha = \frac{F}{P}.$$


y
C
B
$\vec{T}$
α
α
$\vec{j}$
$\vec{F}$
x'
A
S
$\vec{i}$
x
$\vec{P}$
y'
$\sin \alpha = \frac{SA}{SC}$
$\cos \alpha = \frac{SB}{SC}$

Calculons :

$P = m \cdot g$

$= 0{,}5 \cdot 10^{-3} \times 10 = 5 \cdot 10^{-3}\ \text{N}$;

$F = 3 \cdot 10^{-3}\ \text{N}$.

D'où $\tan \alpha = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3}} = 0{,}6$,

soit $\boldsymbol{\alpha \approx 31°}$.

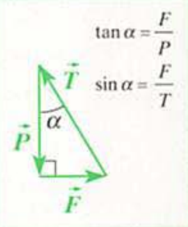
3° $T = \frac{F}{\sin \alpha}$.

Calculons :

$\sin 31° = 0{,}515$, d'où $T = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{0{,}515} \approx \mathbf{5{,}8 \cdot 10^{-3}\ N}$.

Cette solution est destinée à vous entraîner à utiliser les coordonnées des vecteurs force dans une base bien choisie.

Cependant, lorsque deux des trois forces forment un angle droit, on obtient un triangle rectangle en faisant la somme vectorielle : $\vec{P} + \vec{F} + \vec{T}$*, et la résolution est immédiate.*


$\tan \alpha = \frac{F}{P}$
$\sin \alpha = \frac{F}{T}$
$\vec{T}$
α
$\vec{P}$
$\vec{F}$

4

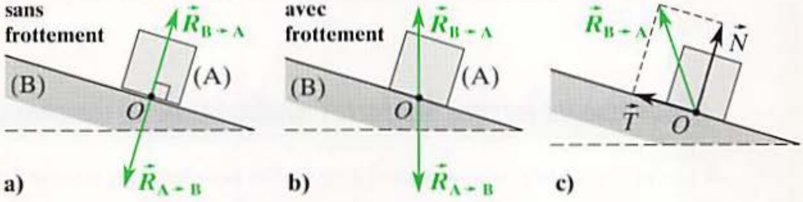
PRINCIPE DE L'INERTIE

RÉSUMÉ DU COURS

Les forces de frottement

Lorsqu'un solide (A) est en contact avec un solide (B) (*fig.* a), (B) exerce sur (A) une réaction $\vec{R}_{B \to A}$ et (A) exerce sur (B) une réaction $\vec{R}_{A \to B}$; dans tous les cas :

$$\boxed{\vec{R}_{A \to B} = -\vec{R}_{B \to A}}$$


sans frottement
$\vec{R}_{B \to A}$
(B)
(A)
O
$\vec{R}_{A \to B}$
a)
avec frottement
$\vec{R}_{B \to A}$
(B)
(A)
O
$\vec{R}_{A \to B}$
b)
$\vec{R}_{B \to A}$
$\vec{N}$
$\vec{T}$
O
c)

En l'absence de frottement, les réactions sont perpendiculaires à la surface de contact (*fig.* b).

En présence de frottement, les réactions sont inclinées par rapport à la normale à la surface de contact. On peut alors décomposer les réactions, suivant les deux directions tangente et normale à la surface (*fig.* c).

Exemple : $\vec{R}_{B \to A} = \vec{T} + \vec{N}$.

$\vec{N}$ est la composante normale de la réaction ;

$\vec{T}$ est la composante tangentielle de la réaction appelée **force de frottement** ; elle dépend de la nature des surfaces en contact.

Lorsqu'il y a glissement, la force de frottement est opposée au sens du mouvement.

Solide isolé ou pseudo-isolé

🟩 Un solide mécaniquement isolé est un solide qui n'est soumis à aucune force. C'est un modèle idéal qui ne peut exister réellement.

🟩 Un solide mécaniquement pseudo-isolé est un solide soumis à des forces extérieures qui se compensent à chaque instant :

$$\boxed{\Sigma \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{0}}$$

Exemple : un mobile autoporteur se déplaçant librement sur coussin d'air le long d'une surface horizontale.

Principe de l'inertie

🟩 **Énoncé :** **dans un référentiel galiléen, lorsqu'un solide est isolé ou pseudo-isolé ($\Sigma \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{0}$), son centre d'inertie G est :**

- **soit au repos, s'il est initialement immobile : $\vec{v}_G = \vec{0}$;**
- **soit animé d'un mouvement rectiligne uniforme : $\vec{v}_G$ = vecteur constant.**

🟩 **Référentiel galiléen :** c'est tout référentiel dans lequel le principe de l'inertie est vérifié. Le référentiel terrestre peut être considéré comme galiléen pour la plupart des expériences.

Mouvements lorsque les forces appliquées ne se compensent pas

🟩 **Cas général :** lors du mouvement d'un mobile pour lequel la somme des forces appliquées n'est pas nulle, la vitesse de son centre d'inertie $\vec{v}_G$ est modifiée.

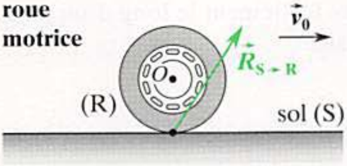
🟩 **Chute libre :** c'est le mouvement d'un corps soumis à son seul poids. Lorsqu'un solide est lâché sans vitesse initiale, son centre d'inertie G acquiert une vitesse $\vec{v}_G$ verticale, après une hauteur de chute h et une durée de chute t telles que :

$$\boxed{v_G = g \cdot t \quad \text{et} \quad v_G^2 = 2g \cdot h}$$

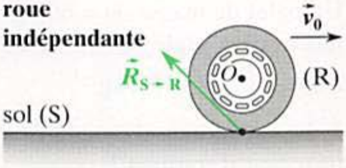
Roues d'un véhicule

- Dans le cas d'une roue motrice (*fig.* a), la réaction du sol sur la roue est inclinée dans le sens du déplacement par rapport à la normale à la surface de contact.

- Dans le cas d'une roue non motrice (*fig.* b) (roue indépendante), la réaction est inclinée en sens contraire du déplacement.


roue motrice
$\vec{v}_0$
$\vec{R}_{S \to R}$
O
(R)
sol (S)

a)


roue indépendante
$\vec{v}_0$
$\vec{R}_{S \to R}$
O
(R)
sol (S)

b)

Solides en mouvement, sans frottement

4.1 Palet autoporteur sur un plan incliné

Un palet de masse $m = 600$ g glisse sans frottement le long d'un plan incliné d'un angle $\alpha = 30°$ avec l'horizontale.

Donnée : $g = 10\ \text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

1° Le système est-il pseudo-isolé ? Le vecteur vitesse $\vec{v}_G$ du centre d'inertie reste-t-il constant ?

2° Le poids $\vec{P}$ peut être décomposé en deux composantes telles que :

$$\vec{P} = \vec{P}_N + \vec{P}_T$$

avec $\vec{P}_N$ composante normale au plan incliné.

a) Faire un schéma et représenter $\vec{P}_N$ et $\vec{P}_T$.

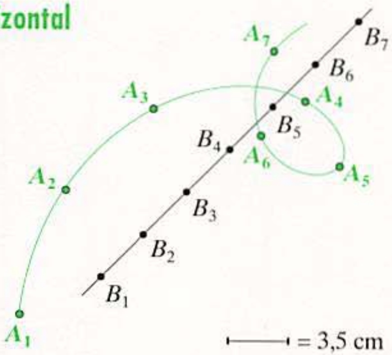
b) Si $\vec{P}_N$ compense $\vec{R}$, calculer la valeur R de $\vec{R}$.

3° *a*) Quel rôle peut-on attribuer à la composante $\vec{P}_T$?

b) Calculer la valeur de $\vec{P}_T$.

4.2 Palet autoporteur sur plan horizontal

On effectue l'enregistrement stroboscopique du mouvement d'un palet muni de deux points lumineux A et B et se déplaçant sur une table à coussin d'air horizontale.



1° Lequel des deux points A et B correspond au centre d'inertie ? Pourquoi ?

2° Déterminer la vitesse $\vec{v}_G$ du centre d'inertie du palet. La période du stroboscope est $T = 60$ ms.

3° *a*) Comment le palet a-t-il été lancé ?

b) Pourquoi ?

Solides avec frottement

♦ 4.3 Équilibre d'un cube sur une surface plane

On pose un cube homogène, de masse $m = 0{,}5$ kg , sur une planche plane.

1° La planche est horizontale et le cube est en équilibre.

a) Faire l'inventaire des forces agissant sur le cube.

b) Écrire la condition d'équilibre du cube.

c) Déterminer la force exercée par la planche sur le cube.

2° La planche est inclinée d'un angle $\alpha = 20°$ avec l'horizontale, et le cube est en équilibre.

a) Faire l'inventaire des forces agissant sur le cube.

b) Écrire la condition d'équilibre du cube.

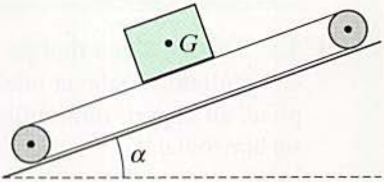
c) Montrer qu'il existe une force de frottement au contact du cube et de la planche. Calculer sa valeur.

3° On incline davantage la planche. Par exemple, lorsque $\alpha = 30°$, le cube glisse. Conclure.

Donnée : $g = 9{,}8 \text{ N.kg}^{-1}$.

♦♦ 4.4 Équilibre d'une caisse posée sur un tapis roulant

Une caisse parallélépipédique de masse $m = 30$ kg est posée sur un tapis roulant faisant un angle $\alpha = 30°$ avec l'horizontale.



1° Le tapis roulant est immobile et la caisse est en équilibre sur le tapis.

a) Énoncer le principe de l'inertie.

b) Faire l'inventaire des forces appliquées à la caisse.

Donnée : $g = 10 \text{ N.kg}^{-1}$.

c) Quelle est la relation qui existe entre ces forces ? En déduire leurs valeurs et les représenter à l'échelle : 0,5 cm ↔ 100 N.

2° Le tapis roulant est en mouvement à la vitesse constante, vers le haut, et la caisse est immobile par rapport au tapis.

a) Quelles sont les forces appliquées à la caisse ?

b) Quelle relation existe entre ces forces ?

c) Donner la valeur de chacune des forces.

3° Le tapis roulant est en mouvement accéléré vers le haut et la caisse reste fixe par rapport au tapis. Répondre aux mêmes questions qu'au **2°**.

♦♦ 4.5 Mouvement d'un parachutiste

Un parachutiste de poids $P = 1\,000$ N saute d'un avion volant à une vitesse de $300 \text{ km} . \text{h}^{-1}$, à une altitude $h_0 = 1\,000$ m.

1° Dessiner l'allure de la trajectoire du centre d'inertie du parachutiste avant l'ouverture du parachute. Donner une explication.

2° Lorsqu'il est à l'altitude $h_1 = 500$ m, le parachutiste déclenche l'ouverture de son parachute. On admet alors que sa trajectoire devient verticale.

a) Faire l'inventaire des forces exercées sur le système {parachutiste - parachute}.

b) Comment varie alors la vitesse du parachutiste ? Envisager plusieurs cas en fonction des valeurs relatives prises par les diverses forces en présence.

3° Lorsque le parachutiste atteint l'altitude $h_2 = 300$ m, son mouvement devient vertical rectiligne et uniforme. Calculer la valeur de la force de résistance de l'air exercée sur le système {parachutiste - parachute}.

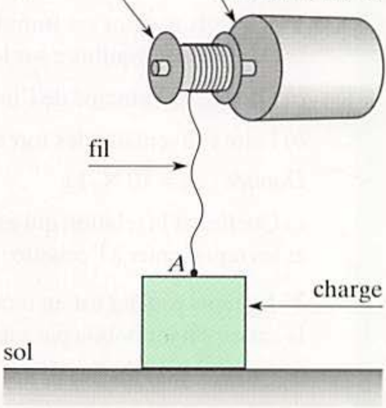
Principe d'inertie et de mouvement

♦ 4.6 Levage d'une charge

Un treuil doit soulever une charge prise, au départ, immobile sur un sol horizontal.
La masse de la charge est $m = 50$ kg.
Donnée : $g = 10 \text{ N} . \text{kg}^{-1}$.

1° Le fil accroché en A étant détendu, faire l'inventaire des forces appliquées à la charge immobile sur le sol.

2° Le treuil est mis en marche et le fil se tend ; la charge est alors mise en mouvement. Au début du mouvement, la tension du fil a pour valeur $T = 600$ N. On néglige les forces de frottement.



a) Quelle est la force motrice ? *b*) Quelle est la force résistante ?

c) Quelle est la nature du mouvement de la charge dans cette phase ?

3° Dans la deuxième phase du mouvement, la charge monte à vitesse constante ; quelle est alors la valeur de la tension du fil ?

4° Dans la troisième phase du mouvement, la vitesse décroît jusqu'à s'annuler. À quelle condition doit obéir la valeur de la tension ?

4.7 Mouvement de chute libre

On lâche, sans vitesse initiale, une bille d'acier du sommet d'une tour, situé à une hauteur $h = 85 \text{ m}$.

1° On néglige les forces de frottement dues à l'air.

a) Quelle est la valeur de la vitesse de la bille à son arrivée au sol ?

Donnée : $g = 9{,}8 \text{ m.s}^{-2}$.

b) Quelle est la durée de cette chute ?

2° On lâche maintenant, du sommet de la tour, une balle de tennis, sans vitesse initiale.

a) La vitesse de la balle, à son arrivée sur le sol, et la durée de chute ont-elles les mêmes valeurs que celles trouvées précédemment ?

b) Justifier les réponses.

4.8 Forces de frottement sur un TGV

Le TGV est soumis à différentes forces de frottement (forces de frottement des rails sur les roues, forces de frottement dues à l'air) qui s'opposent à son mouvement.

La résultante de ces forces, parallèle aux rails, est donnée par l'expression suivante :

$$f = 254 + 3{,}344\, v + 0{,}057\,2\, v^2,$$

avec f en daN et v en km.h^{-1} ?

1° À partir de quelle vitesse le terme en v^2 est-il égal au terme indépendant de v ?

2° À partir de quelle vitesse le terme en v^2 est-il égal au terme en v ?

3° Sur une voie horizontale, quelle est la force motrice nécessaire pour maintenir la vitesse à 250 km.h^{-1} ?

4° Sur une voie rectiligne montante de pente égale à 7 ‰ ($\sin\alpha \approx 0{,}007$), quelle doit être la force motrice nécessaire pour rouler à 250 km.h^{-1} ?
(Le poids d'une rame comprenant deux motrices pour huit remorques est de 386.10^3 daN.)

♦ 4.9 Force de frottement et vitesse limite d'un grêlon

Lorsqu'un corps est en mouvement avec la vitesse v par rapport à l'air, celui-ci exerce sur le corps une résistance due aux frottements dont la valeur est donnée par la relation :

$$R = \frac{1}{2}\,\mathrm{K}\,.\,S\,.\,\rho\,.\,v^2 \ \text{ avec } \ 1\,\mathrm{m\,.\,s^{-1}} < v < 280\,\mathrm{m\,.\,s^{-1}}\,.$$

Dans cette formule, K est une constante liée à la forme du corps ; S ($\mathrm{m^2}$) est l'aire de la surface projetée du corps sur un plan orthogonal à la vitesse ; ρ ($\mathrm{kg\,.\,m^{-3}}$) est la masse volumique de l'air ; v ($\mathrm{m\,.\,s^{-1}}$) est la vitesse du mobile.

1° Calculer la résistance de l'air agissant sur un grêlon assimilé à une sphère de rayon $r = 0{,}5\ \mathrm{cm}$ tombant à la vitesse $v = 19{,}6\ \mathrm{m\,.\,s^{-1}}$.

Données : $\mathrm{K} = 0{,}24$ et $\rho = 1{,}3\ \mathrm{kg\,.\,m^{-3}}$.

2° Calculer le poids de ce grêlon, sachant que la masse volumique de la glace est $\rho' = 920\ \mathrm{kg\,.\,m^{-3}}$.

Données :

- volume d'une sphère de rayon r : $V = \frac{4}{3}\pi\,.\,r^3$;
- intensité de la pesanteur : $\mathrm{g} = 9{,}8\ \mathrm{N\,.\,kg^{-1}}$.

3° Représenter les forces agissant sur le grêlon en prenant 1 cm pour 2 mN. On négligera la poussée d'Archimède due à l'air.

4° Calculer la vitesse limite atteinte par ce grêlon lorsqu'il tombe à vitesse constante.

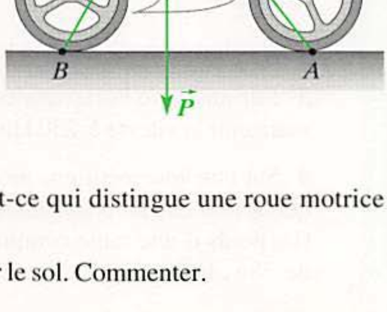
♦♦ 4.10 Roues motrices et roues non motrices

On a schématisé un motard sur sa moto se déplaçant sur un sol horizontal.

1° La moto a un mouvement accéléré. On a représenté les diverses actions qui s'exercent sur le système {motard - moto}.

a) Nommer ces forces en précisant l'agent de la force et le receveur :

$$\vec{F}_{\ldots \to \ldots}$$



b) Quelle est la roue motrice ? Qu'est-ce qui distingue une roue motrice d'une roue non motrice ?

c) Représenter les actions des roues sur le sol. Commenter.

2° Le motard coupe les gaz et débraie. La roue motrice n'est plus entraînée par le moteur. Le mouvement est alors ralenti.

a) Les forces exercées par le sol sur la moto sont-elles orientées :

- toutes deux vers l'avant ?
- toutes deux vers l'arrière ?
- l'une vers l'avant, l'autre vers l'arrière ?

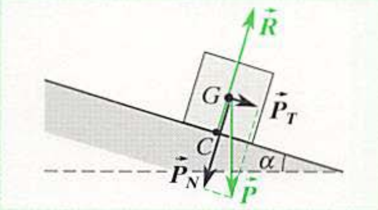
b) Quelle est la force qui freine le plus fortement le motard s'il n'utilise pas les freins de sa moto ?

CORRIGÉS DES EXERCICES

4.1 1° Prenons comme système le palet autoporteur.
Faisons l'inventaire des forces qui lui sont appliquées et que nous représentons ci-dessous :

- le poids $\vec{P}$ vertical, descendant et appliqué en G ;
- la réaction $\vec{R}$ du plan perpendiculaire à la surface de contact (pas de frottement) et appliquée en un point C de cette surface.

La somme des forces $\vec{P}$ et $\vec{R}$ n'est pas nulle, car les deux forces ne sont pas opposées (*cf.* figure du **2°** *a*) : **le mobile n'est pas pseudo-isolé**.
La somme des forces appliquées n'étant pas nulle, la vitesse $\vec{v}_G$ du centre de gravité **varie**.



2° *a*) Projetons le poids $\vec{P}$ selon les deux directions, tangentielle et normale, avec $\vec{P} = \vec{P}_N + \vec{P}_T$.

b) Le mobile glissant parallèlement à la pente, les composantes normales se compensent ; donc :
$P_N = R$, avec $P_N = P \cdot \cos \alpha$,
d'où $R = m \cdot g \cdot \cos \alpha = 0{,}6 \times 10 \times 0{,}866 = 5{,}196$, soit $\boldsymbol{R \approx 5{,}2\ \mathrm{N}}$.

3° *a*) La composante $\vec{P}_T$ peut être considérée comme la **force motrice** puisque c'est la seule qui agit sur le palet, suivant la direction et le sens de son déplacement.

b) Sur la figure, nous constatons que :

$P_T = P \cdot \sin \alpha$, d'où $P_T = m \cdot g \cdot \sin \alpha = 0{,}6 \times 10 \times 0{,}5 = 3$,
soit $\boldsymbol{P_T \approx 3\ \mathrm{N}}$.

4.2 1° Le centre d'inertie G du mobile correspond au **point B**. Le palet autoporteur, sur la table horizontale, est un mobile pseudo-isolé car il n'est soumis qu'à deux forces $\vec{R}$ et $\vec{P}$ **dont la somme est nulle** (en l'absence de frottement, $\vec{R}$ est perpendiculaire au support, donc opposée à $\vec{P}$).
D'après le principe de l'inertie, le centre d'inertie G est animé d'un mouvement rectiligne uniforme, ce qui est le cas pour B. La trajectoire est rectiligne et les positions prises à intervalles de temps égaux sont équidistantes.

2° Le mouvement étant uniforme, la vitesse de B peut être calculée sur un intervalle quelconque, soit, par exemple, $v_B = \dfrac{B_3B_4}{T}$; la vitesse réelle de G sera alors obtenue en tenant compte de l'échelle :

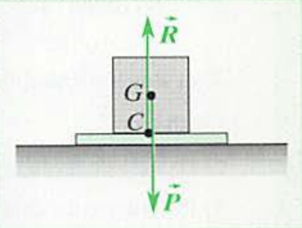
$v_G = \dfrac{3{,}5 \,.\, 10^{-2}}{60 \,.\, 10^{-3}} = 0{,}583$, soit $\boldsymbol{v_G = 0{,}58\ \mathrm{m\,.\,s^{-1}}}$.

3° *a*) Le palet a été lancé en lui communiquant un **mouvement de rotation sur lui-même** (autour d'un axe de rotation vertical et passant par G).

b) Le point A, situé à une certaine distance du point B (correspondant à G), se déplace **sur une trajectoire curviligne** et d'un mouvement varié en restant à distance constante de A ($A_1B_1 = A_2B_2 = \ldots$).

4.3 **1°** *a*) Le système étudié est le cube. Les forces extérieures qui agissent sur le cube sont :

- le **poids** $\vec{P}$, vertical, descendant et appliqué en G ;
- la **réaction** $\vec{R}$ du support, verticale, ascendante et appliquée en un point C de la surface de contact.



b) Soumis à l'action de deux forces, le cube est en équilibre si $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$.

c) De la relation précédente, on tire :

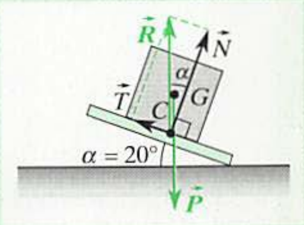
$$\vec{R} = -\vec{P} \text{ et } R = P.$$

La réaction $\vec{R}$ est donc verticale, c'est-à-dire, ici, perpendiculaire à la surface de contact (horizontale), dirigée vers le haut, de valeur :

$R = m\,.\,g = 0{,}5 \times 9{,}8$, soit $\boldsymbol{R = 4{,}9\ \mathrm{N}}$.

2° *a*) Comme au **1°** *a*), il n'y a que deux forces $\vec{P}$ **et** $\vec{R}$.

b) $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$. Les deux forces sont encore opposées : $\boldsymbol{P = R}$.



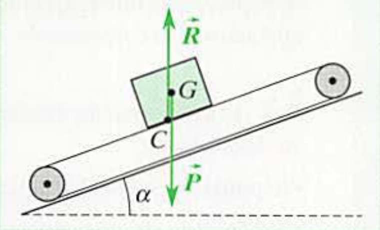
c) Représentons le système à l'équilibre en faisant figurer les forces exercées sur le cube. Les deux forces étant opposées, la réaction $\vec{R}$ est verticale et appliquée au point de contact C (sur la verticale de G) ; elle a donc une composante $\vec{T}$ parallèle au support (tangentielle) ; c'est la force de frottement : $\vec{R} = \vec{T} + \vec{N}$ et $T = R\,.\,\sin\alpha$;
or $R = P$, d'où $T = m\,.\,g\,.\,\sin\alpha = 0{,}5 \times 9{,}8 \times \sin 20°$, soit $\boldsymbol{T = 1{,}68\ \mathrm{N}}$.

3° Lorsque le cube glisse, $\vec{P}+\vec{R}\neq\vec{0}$. Donc $T\neq m\,.\,\mathrm{g}\,.\,\sin\alpha$.
Puisque le cube se déplace vers le bas, la composante du poids « l'emporte » sur la force de frottement : $\boldsymbol{m\,.\,\mathrm{g}\,.\,\sin\alpha > T}$.

4.4 **1°** *a*) *Cf.* le résumé du cours.

b) Le système étudié est la caisse. Les forces qui agissent sur la caisse sont :

- le **poids** $\vec{P}$, vertical, descendant et appliqué en G ;
- la **réaction** $\vec{R}$ du tapis, vers le haut et appliquée en un point de la surface de contact.



c) La vitesse du centre de gravité G de la caisse étant nulle, le principe d'inertie nous permet d'affirmer que :

$$\Sigma\vec{F}=\vec{P}+\vec{R}=\vec{0}.$$

$P=m\,.\,\mathrm{g}=30\times 10=300$,
soit $\boldsymbol{P=300}$ **N**.

$$\vec{P}=-\vec{R},\ \text{donc}\ \begin{cases} R=P,\ \text{soit}\ \boldsymbol{R}=300\ \mathrm{N}\\ \vec{R},\ \text{verticale et opposée à}\ \vec{P}. \end{cases}$$

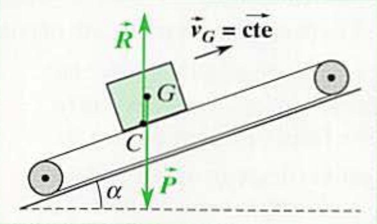
2° *a*) Les forces appliquées à la caisse sont ici encore :

- le **poids** $\vec{P}$;
- la **réaction** $\vec{R}$ du tapis.

b) La vitesse du centre de gravité de la caisse étant constante, le principe d'inertie nous permet d'affirmer que :

$$\boldsymbol{\Sigma\vec{F}=\vec{P}+\vec{R}=\vec{0}}.$$

c) Comme au **1°** *c*) : $\boldsymbol{R=P=300}$ **N**.



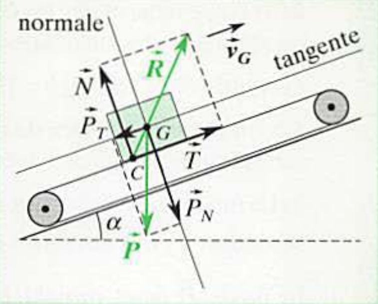
3° *a*) Les forces appliquées à la caisse sont encore :

- le **poids** $\vec{P}$;
- la **réaction** $\vec{R}$ du tapis.

b) Le mouvement étant accéléré vers le haut, la vitesse du tapis, donc du centre de gravité G de la caisse, n'est plus constante : **elle augmente**.

Le principe de l'inertie conduit à écrire que :

$$\Sigma \vec{F} = \vec{R} + \vec{P} \neq \vec{0} \Leftrightarrow \vec{N} + \vec{T} + \vec{P} \neq \vec{0}.$$



c) Projetons la relation précédente sur les deux directions, normale et tangentielle.

- *Sur la normale* : $\vec{N} + \vec{P}_N = \vec{0}$,

car le centre de gravité n'a pas de mouvement par rapport à cette direction : $\vec{v}_{G_N} = \vec{0}$.

Donc $N = P_N = P \,.\, \cos \alpha$,

d'où $N = m \,.\, \mathrm{g} \,.\, \cos \alpha = 30 \times 10 \times 0{,}866 = 259{,}81$, soit $\boldsymbol{N \approx 260}$ **N**.

- *Sur la tangente*, la vitesse augmente : $\vec{T} + \vec{P}_T \neq \vec{0}$.

Donc $T > P_T$, car le mouvement est accéléré vers le haut.

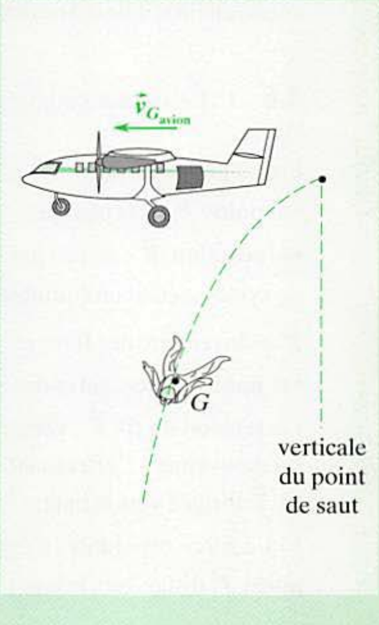
D'où $T > m \,.\, \mathrm{g} \,.\, \sin \alpha$, soit $T > 30 \times 10 \times 0{,}5$, c'est-à-dire $\boldsymbol{T > 150}$ **N**.

4.5 **1°** Dans le référentiel terrestre, le centre d'inertie du parachutiste décrit une trajectoire courbe à peu près parabolique, à tangente horizontale au point de départ.

Le parachutiste quittant l'avion est animé de la même vitesse que l'avion : 300 km . h^{-1} ; il tombe en chute libre avec une vitesse initiale horizontale $v_0 = 300$ km . h^{-1}.

Un corps lancé horizontalement à une certaine vitesse décrit une trajectoire horizontale s'il est isolé ou pseudo-isolé.

Le parachutiste, soumis à son poids vertical et descendant, n'est pas pseudo-isolé ; il s'écarte donc de la trajectoire horizontale.



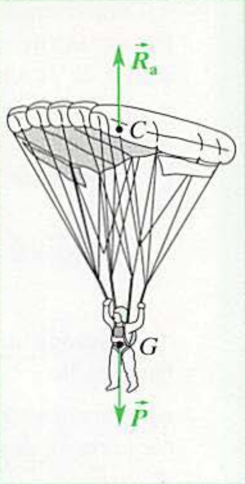
2° *a*) Le système étudié est celui du {parachute - parachutiste}. Inventaire des forces :

- le **poids** $\vec{P}$ de valeur $P = 1000$ N ;
- la **force de résistance de l'air** $\vec{R}_a$ s'exerçant surtout sur le parachute ouvert.

b) Le mouvement ayant une trajectoire verticale, la somme $\vec{R}_a + \vec{P}$ des forces est **verticale**.

Le poids $\vec{P}$ étant vertical, la résistance de l'air $\vec{R}$ sera aussi verticale. Il suffit de raisonner sur les valeurs des forces :

- $R_a > P$: la résultante des forces est dirigée vers le haut et ralentit donc la chute ; v_G diminue à partir de l'instant de l'ouverture du parachute.

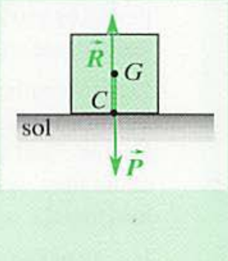


- $R_a = P$: la résultante des forces est nulle ; le système est alors pseudo-isolé. Le principe de l'inertie conduit à conclure que $\vec{v}_G = \overrightarrow{C^{te}}$.

3° Le mouvement devient uniforme, le système est pseudo-isolé (principe de l'inertie). C'est le deuxième cas ci-dessus ($R_a = P = 1\,000$ N).
Donc $\boldsymbol{R_a = 1\,000}$ **N**.

Remarque : la résistance de l'air a une valeur R_a qui dépend de la vitesse ; elle est grande à l'ouverture du parachute, et diminue ensuite au fur et à mesure que la vitesse diminue. Elle devient ensuite égale au poids et la vitesse reste constante.

4.6 **1°** Le système étudié est la charge à soulever.



Inventaire des forces :

- le **poids** $\vec{P}$ de la charge,
- la **réaction** $\vec{R}$ exercée par le sol.

Le système étant en équilibre, $\boldsymbol{\Sigma \vec{F} = \vec{P} + \vec{R} = \vec{0}}$.

2° *a*) Inventaire des forces :

- le **poids** $\vec{P}$, vertical et descendant ;
- la **tension du fil** $\vec{T}$, verticale et ascendante.

Le mouvement s'effectuant vers le haut, la force motrice est la **tension du fil** $\vec{T}$ dirigée vers le haut.

b) La force résistante, s'opposant donc au mouvement ascendant, est le **poids** $\vec{P}$ dirigé vers le bas. ($P = m \, . \, g = 50 \times 10 = 500$ N .)

c) La tension T a une valeur supérieure à celle du poids P ; la somme des forces n'est pas nulle et représente une force dirigée vers le haut : la vitesse $\vec{v}_G$ du centre de gravité augmente, **le mouvement est accéléré**.

3° Lorsque la vitesse du centre de gravité reste constante, le système est pseudo-isolé : $\Sigma\vec{F}=\vec{T}+\vec{P}=\vec{0}$.
D'après le principe de l'inertie : $T=P=500\ \mathrm{N}$, soit $\boldsymbol{T=500\ \mathrm{N}}$.

4° La vitesse verticale et vers le haut diminue **sous l'action d'une force verticale et vers le bas** : la somme des forces est donc une force dirigée vers le bas :
$\vec{P}+\vec{T}\neq\vec{0}$, avec $T<P$; donc $\boldsymbol{T<500\ \mathrm{N}}$.

4.7 1° *a*) Lors d'une chute libre, sans vitesse initiale, la vitesse acquise après une chute de la hauteur h est donnée par la relation :
$v^2=2\mathrm{g}\,.\,h$, d'où $v=\sqrt{2\mathrm{g}\,.\,h}=\sqrt{2\times9{,}8\times85}=40{,}816$,
soit $\boldsymbol{v\approx40{,}8\ \mathrm{m\,.\,s^{-1}}\approx147\ \mathrm{km\,.\,h^{-1}}}$.

b) Après une durée de chute t, la vitesse vaut :

$v=\mathrm{g}\,.\,t$, d'où $t=\dfrac{v}{\mathrm{g}}=\dfrac{40{,}8}{9{,}8}=4{,}16$, soit $\boldsymbol{t\approx4{,}16\ \mathrm{s}}$.

2° *a*) **La vitesse acquise** par la balle de tennis tombant de la même hauteur que la bille, **sera plus faible et la durée de la chute sera plus grande**.

b) Les relations utilisées au **1°** sont celles de la chute libre (corps soumis seulement au poids). La balle de tennis étant plus grosse et moins lisse, les forces dues aux frottements de l'air ne sont plus négligeables : la force motrice étant plus faible qu'en chute libre, la variation de vitesse sera moins grande et la chute durera donc plus longtemps.

4.8 1° Il faut que :

$0{,}057\,2\,v^2=254$, d'où $v^2=\dfrac{254}{0{,}057\,2}$, ou $v=\sqrt{\dfrac{254}{0{,}057\,2}}=66{,}64$,

soit $\boldsymbol{v\approx66{,}7\ \mathrm{km\,.\,h^{-1}}}$.

2° Il y a égalité des deux termes lorsque :

$3{,}344\,v=0{,}057\,2\,v^2$, d'où $v=\dfrac{3{,}344}{0{,}057\,2}=58{,}46$,

soit $\boldsymbol{v=58{,}5\ \mathrm{km\,.\,h^{-1}}}$.

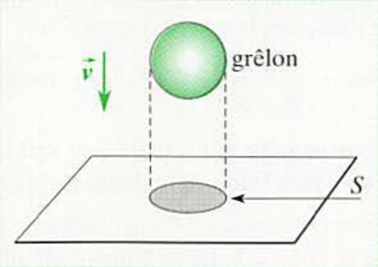
3° Pour maintenir la vitesse du TGV constante, la force motrice doit compenser la force de frottement. Ces deux forces, de sens opposés, ont la même valeur : $F=f$.

Pour $v=250\ \mathrm{km\,.\,h^{-1}}$, $F=254+3{,}344\times 250+0{,}057\,2\times 250^2$,
d'où $F=254+836+3\,575=4\,665$, soit $\mathbf{F=4\,665\ daN=46\,650\ N}$.

4° La force motrice doit compenser, outre la force de frottement, la composante tangentielle du poids $P_T=P\,.\sin\alpha$ (*cf.* exercice **4.1**) :
$F=f+P\,.\sin\alpha$, d'où $F=46\,650+386\,.\,10^4\times 7\,.\,10^{-3}=73\,670$,
soit $\mathbf{F\approx 73\,700\ N}$.

La force motrice est nettement plus importante lorsque la voie est montante.

4.9 **1°** Utilisons la relation :
$R=\dfrac{1}{2}\mathrm{K}\,.\,S\,.\,\rho\,.\,v^2$, avec $S=\pi\,.\,r^2$; donc $R=\dfrac{1}{2}\mathrm{K}\,.\,\pi\,.\,r^2\,.\,\rho\,.\,v^2$,
d'où $R=0{,}5\times 0{,}24\times 3{,}14\times 25\,.\,10^{-6}\times 1{,}3\times 19{,}6^2=4\,704\,.\,10^{-6}$,
soit $\mathbf{R\approx 4{,}7\,.\,10^{-3}\ N}$.



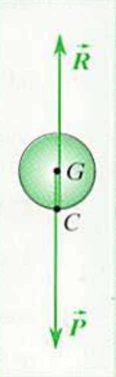
2° $P=m\,.\,\mathrm{g}=\rho'\,.\,V\,.\,\mathrm{g}=\rho'\times\dfrac{4}{3}\pi\,.\,r^3\,.\,\mathrm{g}$,

d'où $P=0{,}92\,.\,10^3\times\dfrac{4}{3}\times 3{,}14\times 125\,.\,10^{-9}\times 9{,}80=4\,718{,}4\,.\,10^{-6}$,

soit $\mathbf{P\approx 4{,}7\,.\,10^{-3}\ N}$.

3° Représentation des forces (*cf.* la figure ci-contre) :

- longueur de $\vec{R}$: $\mathbf{L_{\vec{R}}=2{,}35\ cm}$;
- longueur de $\vec{P}$: $\mathbf{L_{\vec{P}}=2{,}35\ cm}$.



4° Lorsque ce grêlon tombe à la vitesse limite, celle-ci est constante, et d'après le principe de l'inertie, il s'ensuit :

$\Sigma\vec{F}=\vec{0}$, soit $\vec{R}+\vec{P}=\vec{0}$ et $\vec{R}=-\vec{P}$.

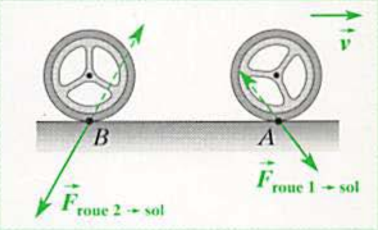
On peut dire qu'à la vitesse du **1°**, $R\approx P\approx 4{,}7\,.\,10^{-3}\ \mathrm{N}$, la vitesse limite est voisine de $\mathbf{19{,}6\ m\,.\,s^{-1}}$.

4.10 1° *a*)

- $\vec{P}$ est le poids du système {motard - moto} ; il représente la force d'attraction de la Terre T sur le système : $\vec{P} = \vec{F}_{\mathrm{T} \to \mathrm{système}}$.
- $\vec{R}_1$ est la réaction du sol au niveau de la roue avant ; elle représente l'action du sol sur la roue avant : $\vec{R}_1 = \vec{F}_{\mathrm{sol} \to \mathrm{roue\,av}}$.
- $\vec{R}_2$ est la réaction du sol au niveau de la roue arrière ; elle représente l'action du sol sur la roue arrière : $\vec{R}_2 = \vec{F}_{\mathrm{sol} \to \mathrm{roue\,arr}}$.
- $\vec{F}$ est la force de frottement exercée par l'air sur l'ensemble du système : $\vec{F} = \vec{F}_{\mathrm{air} \to \mathrm{système}}$.

b) La roue motrice est celle qui reçoit du sol une action dirigée vers l'avant.
La roue arrière est motrice.
La roue motrice est en liaison mécanique avec l'arbre moteur, **la roue non motrice est indépendante** du moteur.

c) Utilisons le principe d'interaction pour expliquer ce qui a lieu en chacun des deux points de contact. (*Cf.* figure ci-contre.)



$\vec{v}$
B
A
$\vec{F}_{\mathrm{roue\,1} \to \mathrm{sol}}$
$\vec{F}_{\mathrm{roue\,2} \to \mathrm{sol}}$

- Roue avant, en A : $\vec{F}_{\mathrm{sol} \to \mathrm{roue\,1}} = \vec{R}_1 = -\vec{F}_{\mathrm{roue\,1} \to \mathrm{sol}}$,

soit $\vec{F}_{\mathrm{roue\,1} \to \mathrm{sol}} = -\vec{R}_1$.

La roue avant a tendance à s'enfoncer vers l'avant dans le sol.

- Roue arrière, en B : $\vec{F}_{\mathrm{sol} \to \mathrm{roue\,2}} = \vec{R}_2 = -\vec{F}_{\mathrm{roue\,2} \to \mathrm{sol}}$,

soit $\vec{F}_{\mathrm{roue\,2} \to \mathrm{sol}} = -\vec{R}_2$.

La roue arrière a tendance à creuser le sol vers l'arrière (c'est ainsi qu'elle peut projeter des gravillons vers l'arrière).

2° Moteur débrayé, mouvement ralenti du système.

a) Les forces exercées par le sol sur la moto sont, dans ce cas, **toutes deux orientés vers l'arrière**.
Elles représentent des actions de résistance à l'avancement.

b) Les composantes tangentielles de ces deux forces sont très inférieures à la force due à la résistance de l'air $\vec{F}$ tant que la vitesse n'est pas faible.

C'est donc la force $\vec{F}$ qui s'oppose le plus fortement à l'avancement du système {moto - motard}.

5

ROTATION D'UN SOLIDE AUTOUR D'UN AXE FIXE

RÉSUMÉ DU COURS

Couple de forces

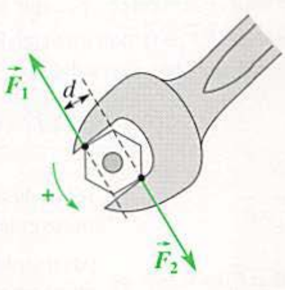
- Un couple de forces est un ensemble de deux forces $(\vec{F}_1, \vec{F}_2)$ telles que :

$$\begin{cases} \vec{F}_1 = -\vec{F}_2 \,; \\ \vec{F}_1 \text{ et } \vec{F}_2 \quad \text{ont des droites d'action distinctes. Ces droites, parallèles, définissent le plan du couple.} \end{cases}$$

- Le moment $\mathcal{M}$ d'un couple, par rapport à un axe perpendiculaire au plan, caractérise l'efficacité du couple sur la rotation du solide autour de cet axe :

$$\boxed{\mathcal{M} = F \cdot d}$$

Unités : $\mathcal{M}$ en newton-mètre (N . m), F en newton (N) et d en mètre (m).



- F est l'intensité commune des deux forces : $F = F_1 = F_2$.
- d est le bras de levier, ou la distance entre les droites d'action des deux forces.

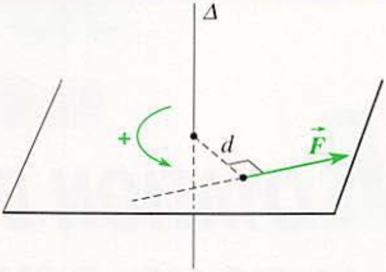
Il est commode d'orienter le plan du couple en choisissant un sens positif de rotation arbitraire et d'attribuer au moment du couple une valeur algébrique :

- $\mathcal{M} = F \cdot d > 0$ si le couple tend à faire tourner dans le sens positif ;
- $\mathcal{M} = -F \cdot d < 0$ si le couple tend à faire tourner dans le sens négatif.

Moment d'une force par rapport à un axe

Le moment $\mathcal{M}_\Delta$ d'une force $\vec{F}$ orthogonale à un axe de rotation Δ, est égal au produit de l'intensité F de la force, par la distance d entre l'axe et la droite d'action de la force :

$$\boxed{\mathcal{M}_\Delta = F \cdot d}$$



Unités : $\mathcal{M}_\Delta$ en newton-mètre (N . m), F en newton (N) et d en mètre (m).
Comme le moment d'un couple, le moment d'une force est algébrique ; son signe dépend de l'orientation choisie.

Une force dont la droite d'action rencontre l'axe de rotation possède un moment nul par rapport à cet axe.

Condition d'équilibre d'un solide mobile autour d'un axe fixe

Théorème des moments : lorsqu'un solide, mobile autour d'un axe fixe d'un repère terrestre, est en équilibre sous l'action de plusieurs forces, ou couples de forces, orthogonales à l'axe, la somme des moments des forces, ou des couples, par rapport à cet axe est nulle. Ces moments étant comptés algébriquement, on obtient :

$$\boxed{\Sigma \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_i) = 0}$$

Conditions générales d'équilibre d'un solide mobile autour d'un axe fixe Δ d'un repère terrestre : puisque le solide est en équilibre, on sait que la condition nécessaire $\Sigma \vec{F}_i = \vec{0}$ doit être satisfaite. Nous obtenons donc deux conditions nécessaires à l'équilibre d'un solide :

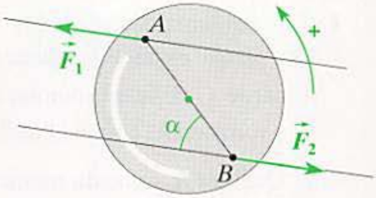
$$\boxed{\Sigma \vec{F}_i = \vec{0} \quad \text{et} \quad \Sigma \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_i) = 0}$$

- $\Sigma \vec{F} = \vec{0}$ ⇔ repos du centre d'inertie G ou mouvement rectiligne uniforme de G.
- $\Sigma \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_i) = 0$ ⇔ pas de rotation autour de l'axe ou mouvement de rotation uniforme autour de l'axe.

Calculs de moments

5.1 Moment d'un couple

Sur une poignée de porte, on exerce un couple de forces schématisé ci-dessous. On note F la valeur commune des deux forces.



1° Quel est le signe du moment de ce couple ?

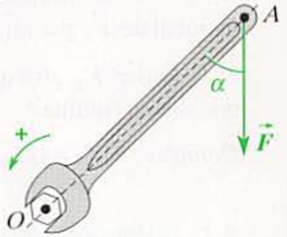
2° Dessiner le bras de levier.

3° Donner l'expression de ce moment en fonction de F, AB et α.

4° Calculer la valeur de ce moment pour : $F = 5\ \text{N}$, $AB = 10\ \text{cm}$ et $\alpha = 60°$.

5.2 Moment d'une force

Afin de visser un écrou d'axe Δ passant par O, on exerce, à l'extrémité d'une clé, une force $\vec{F}$ comme l'indique la figure ci-dessous.



1° Quel est le signe du moment de cette force par rapport à l'axe de l'écrou ?

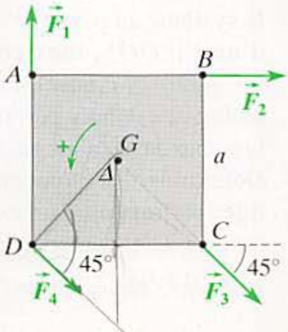
2° Donner l'expression de ce moment en fonction de F, OA et α.

3° Calculer ce moment pour :
$F = 20\ \text{N}$, $OA = 0{,}15\ \text{m}$ et $\alpha = 50°$.

5.3 Plaque en rotation soumise à plusieurs forces

Une plaque ayant la forme d'un carré $ABCD$, de côté a, est mobile dans le plan vertical, autour d'un axe horizontal Δ passant par le centre d'inertie G du carré.

Des forces $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, $\vec{F}_3$ et $\vec{F}_4$ sont appliquées aux sommets A, B, C et D comme l'indique la figure ci-contre.



1° Tracer le bras de levier correspondant à chacune de ces forces.

2° Calculer le moment de chacune de ces forces par rapport à l'axe Δ.

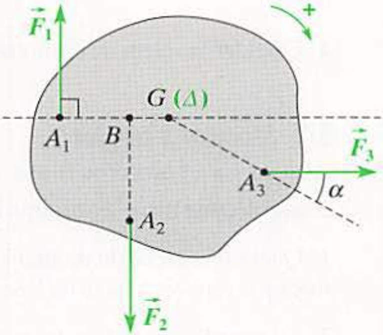
3° Le carré peut-il être en équilibre ?

Données : $F_1 = F_4 = 1{,}6\ \text{N}$; $F_2 = F_3 = 2\ \text{N}$; $a = 60\ \text{cm}$.

Équilibre d'un solide

♦ 5.4 Équilibre d'une plaque

Une plaque est mobile autour d'un axe horizontal Δ passant par son centre d'inertie G. Elle est soumise à un couple de forces $(\vec{F}_1, \vec{F}_2)$ et à une force $\vec{F}_3$, horizontale, comme l'indique la figure ci-dessous.



1° Quel est le signe du moment du couple et celui du moment de $\vec{F}_3$ par rapport à l'axe de rotation ?

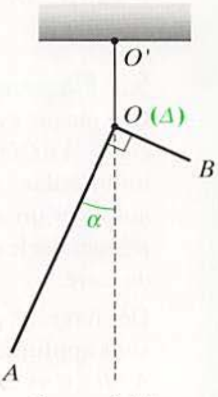
2° *a*) Calculer le moment du couple.

b) Donner l'expression du moment de $\vec{F}_3$ par rapport à Δ.

3° Calculer F_3 afin que la plaque soit en équilibre.

Données : $GA_1 = GA_2 = GA_3 = 20\ \text{cm}$; $GB = 8\ \text{cm}$; $F_1 = 10\ \text{N}$; $\alpha = 30°$.

5.5 Équilibre d'une équerre soumise à deux forces

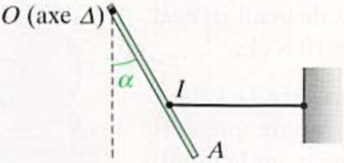


On soude, à angle droit, deux tiges homogènes OA et OB, de masses m_1 et m_2. On suspend le système au point O', par l'intermédiaire d'un fil OO', inextensible et sans masse (*cf.* figure ci-contre). Le système prend une inclinaison donnée par $\alpha = 6{,}3°$; sur la figure, la valeur de α n'est pas respectée.
Déterminer les moments des poids des deux tiges par rapport à un axe horizontal Δ passant par O et perpendiculaire à leur plan.

Données : $OA = 3OB = 0{,}90\ \text{m}$; $g = 9{,}8\ \text{N}.\text{kg}^{-1}$; $m_1 = 3m_2 = 1{,}5\ \text{kg}$.

♦ 5.6 Équilibre d'une poutre

Une poutre homogène, de masse m, peut tourner autour d'un axe Δ (*cf.* figure). Sous l'action d'une force $\vec{F}$ exercée par un fil horizontal, elle fait un angle α avec la verticale.



1° Faire le bilan des différentes forces exercées sur la poutre.

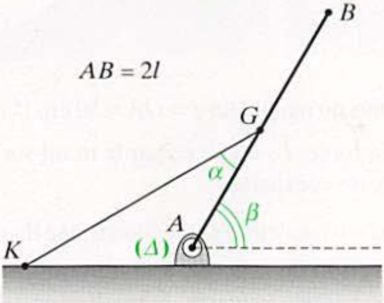
2° Calculer les moments des différentes forces par rapport à l'axe de rotation Δ.

3° Calculer la réaction de l'axe.

Données : $OA = L = 30\text{ cm}$; $OI = l = 20\text{ cm}$; $m = 100\text{ g}$; $\alpha = 30°$; $g = 9{,}8\text{ N.kg}^{-1}$; $F = 0{,}43\text{ N}$.

♦ 5.7 Équilibre d'un mât

Un mât, assimilable à une barre rigide et homogène AB, de longueur $2l$, de poids $\vec{P}$ ($P = 20\text{ N}$), peut tourner, dans un plan vertical (que l'on a pris comme plan de figure), autour d'un axe Δ horizontal passant par son extrémité A. Il est maintenu par un fil inextensible et de masse négligeable situé dans le même plan vertical que le mât. Ce fil est fixé au centre d'inertie G du mât. Il fait un angle $\alpha = 30°$ avec la direction du mât qui, lui-même, fait un angle $\beta = 60°$ avec l'horizontale.



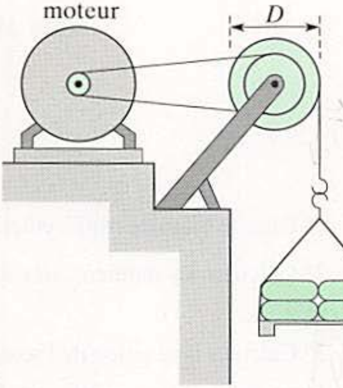
1° Déterminer la tension T du fil.

2° Déterminer la réaction $\vec{R}$ de l'axe passant par A.

Solides en mouvement uniforme

♦♦ 5.8 Principe de l'inertie pour la rotation

Un moteur entraîne un treuil soulevant une charge de 200 kg. Le diamètre D du treuil est égal à 20 cm et $g = 10\ \text{N.kg}^{-1}$.

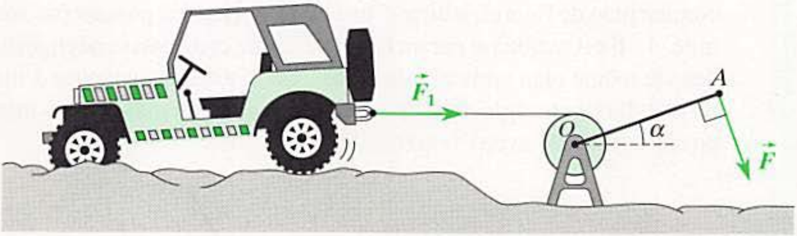


1° Quelle doit être la valeur minimale du couple que doit exercer le moteur sur le treuil, par l'intermédiaire de la courroie, pour soulever la charge à vitesse constante ?

2° Le couple de frottement a une valeur de 50 N.m. Quelle est, en réalité, la valeur du couple moteur ?

♦♦ 5.9 Réactions d'axe sur un treuil

Afin de désensabler une voiture, on exerce sur la manivelle d'un treuil une force $\vec{F}$ d'intensité 400 N, comme l'indique la figure ci-dessous.



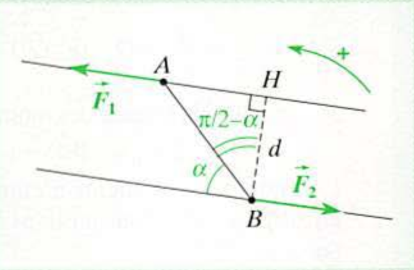
Données : bras de manivelle $l = OA = 50$ cm ; rayon du treuil $R = 10$ cm.

1° Calculer la force $\vec{F}_1$ exercée par le treuil sur la voiture lorsque celle-ci est tirée à vitesse constante.

2° Lorsque $\alpha = 0°$, calculer la réaction d'axe du treuil.

La droite d'action de la force $\vec{F}$ est toujours orthogonale au bras de la manivelle. On néglige la masse du treuil et on admet que le centre d'inertie du treuil est fixe.

CORRIGÉS DES EXERCICES



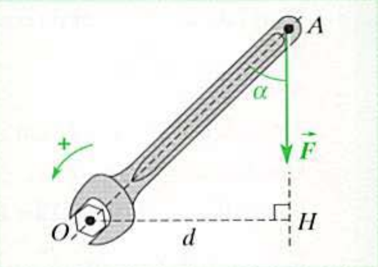
5.1 1° **Le moment du couple est positif**, car ce couple de forces tend à faire tourner le solide sur lequel on l'applique dans le sens positif indiqué sur la figure ci-contre.

2° Le bras de levier est représenté par (BH).

3° $\mathcal{M} = F\,.\,d$, avec $d = BH$;

or $BH = AB\,.\cos\left(\dfrac{\pi}{2} - \alpha\right) = AB\,.\sin\alpha$, d'où $\boldsymbol{\mathcal{M} = F\,.\,AB\,.\sin\alpha}$.

4° $\mathcal{M} = 5 \times 0{,}1 \times \sin 60$, soit $\boldsymbol{\mathcal{M} = 0{,}433\ \mathrm{N\,.\,m}}$.



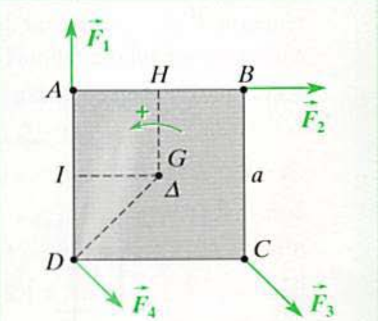
5.2 1° **Le moment de la force $\vec{F}$ est négatif**, car cette force tend à faire tourner la clé sur laquelle on l'applique dans le sens opposé au sens positif indiqué sur la figure ci-contre.

2° Le bras de levier d de la force est la distance entre le support de la force et l'axe de rotation : $d = OH$.

Dans le triangle rectangle OAH, on a :

$OH = OA\,.\sin\alpha$, d'où $d = OA\,.\sin\alpha$, donc $\boldsymbol{\mathcal{M} = -F\,.\,d = -F\,.\,OA\,.\sin\alpha}$.

3° $\mathcal{M} = -20 \times 0{,}15 \times \sin 50°$, d'où $\boldsymbol{\mathcal{M} = -2{,}3\ \mathrm{N}}\,.\,\mathrm{m}$.



5.3 1° Les bras de levier ont été tracés en pointillés. La droite d'action de F_3 passe par G.

2° Calculons les différents moments :

- $\mathcal{M}_\Delta(F_1) = -F_1\,.\,GI = -F_1\,.\,\dfrac{a}{2}$,

d'où $\boldsymbol{\mathcal{M}_\Delta(F_1) = -0{,}48\ \mathrm{N\,.\,m}}$.

Le moment est négatif car $\vec{F}_1$ fait tourner dans le sens contraire au sens positif choisi.

- $\mathcal{M}_\Delta(F_2) = -F_2 \,.\, GH = -F_2 \,.\, \frac{a}{2}$, d'où $\boldsymbol{\mathcal{M}_\Delta(F_1) = -0{,}60\ \mathrm{N\,.\,m}}$.
- $\boldsymbol{\mathcal{M}_\Delta(F_3) = 0}$, car la droite d'action de $\vec{F_3}$ passe par G.
- $\mathcal{M}_\Delta(F_4) = F_4 \,.\, GD$; or $GD = \frac{a\sqrt{2}}{2}$, d'où $\boldsymbol{\mathcal{M}_\Delta(F_4) = 0{,}68\ \mathrm{N\,.\,m}}$.

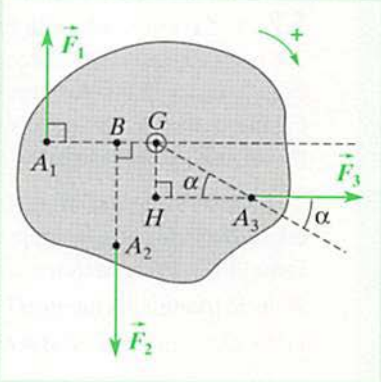
3° Calculons la somme des moments :

$$\Sigma\mathcal{M}_\Delta = -0{,}48 + (-0{,}60) + 0{,}68 = -0{,}4\ \mathrm{N\,.\,m}.$$

La somme des moments n'étant pas nulle, **le carré ne peut pas être en équilibre** ; il va tourner dans le sens inverse du sens arbitraire choisi, puisque : $\Sigma\mathcal{M}_\Delta < 0$.

5.4 **1° Le moment du couple est positif**, car le couple de forces $(\vec{F_1}, \vec{F_2})$ tend à faire tourner la plaque dans le sens positif choisi.

Le moment de $\vec{F_3}$ est négatif, car cette force tend à faire tourner la plaque dans l'autre sens.



2° *a*) Le bras de levier du couple est A_1B :

$A_1B = GA_1 - GB$,

d'où $A_1B = 20 - 8 = 12$ cm.

Or $\mathcal{M}_{\text{couple}} = F_1 \,.\, A_1B$,

donc $\boldsymbol{\mathcal{M}_{\text{couple}} = 10 \times 0{,}12 = 1{,}2\ \mathrm{N\,.\,m}}$.

b) Le bras de levier de $\vec{F_3}$ est GH.

On a : $\mathcal{M}_\Delta(\vec{F_3}) = -F_3 \,.\, GH$.

Or $GH = GA_3 \,.\, \sin\alpha$,

donc $\boldsymbol{\mathcal{M}_\Delta(\vec{F_3}) = -F_3 \,.\, GA_3 \,.\, \sin\alpha}$.

3° La plaque est soumise au couple de force $(\vec{F_1}, \vec{F_2})$, à la force $\vec{F_3}$ et à la réaction $\vec{R}$ de l'axe autour duquel elle pivote. Cette force, appliquée en G, a un moment nul par rapport à l'axe de rotation (Δ, G).

La plaque étant en équilibre :

$$\mathcal{M}_{\text{couple}} + \mathcal{M}_\Delta(\vec{F_3}) + \mathcal{M}_\Delta(\vec{R}) = 0.$$

Or $\mathcal{M}_\Delta(\vec{R}) = 0$,

donc $\mathcal{M}_\Delta(\vec{F_3}) = -\mathcal{M}_{\text{couple}}$,

d'où $-F_3 \,.\, GA_3 \,.\, \sin\alpha = -1{,}2$,

puis $F_3 \times 0{,}2 \times \sin 30° = 1{,}2$,

soit $\boldsymbol{F_3 = 12\ \mathrm{N}}$.

5.5 Choisissons un sens positif de rotation :

$\mathcal{M}_\Delta(\vec{P_1}) = P_1 \cdot OH_1 = m_1 \cdot g \cdot OG_1 \cdot \sin\alpha$,

donc $\mathcal{M}_\Delta(\vec{P_1}) = m_1 \cdot g \cdot \dfrac{OA}{2} \cdot \sin\alpha$,

d'où $\mathcal{M}_\Delta(\vec{P_1}) = 1{,}5 \times 9{,}8 \times 0{,}45 \times \sin(6{,}3°)$,

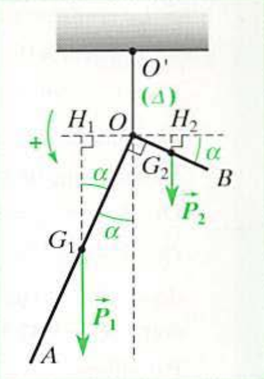
soit $\boldsymbol{\mathcal{M}_\Delta(\vec{P_1}) = 0{,}73\ \mathrm{N} \cdot \mathrm{m}}$.

De même :

$\mathcal{M}_\Delta(\vec{P_2}) = -P_2 \cdot OH_2 = -m_2 \cdot g \cdot OG_2 \cdot \cos\alpha$,

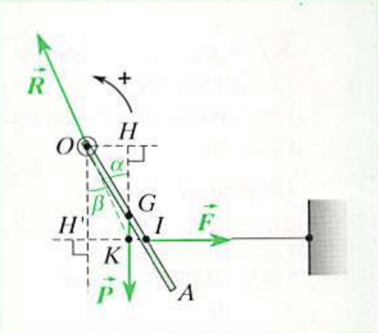
d'où $\mathcal{M}_\Delta(\vec{P_2}) = -0{,}5 \times 9{,}8 \times 0{,}15 \times \cos(6{,}3°)$,

soit $\boldsymbol{\mathcal{M}_\Delta(\vec{P_2}) = -0{,}73\ \mathrm{N} \cdot \mathrm{m}}$.



5.6 1° La poutre est soumise à trois forces :

- son poids $\vec{P}$, dont le point d'application est G ;
- la force $\vec{F}$ exercée par le fil horizontal dont le point d'application est I ;
- la réaction $\vec{R}$ de l'axe de la rotation en O, dont le point d'application est O.



2° Orientons arbitrairement en choisissant un sens positif de rotation.

Le poids $\vec{P}$ fait tourner la barre dans le sens négatif, donc :

- $\mathcal{M}_\Delta(\vec{P}) = -P \cdot OH = -m \cdot g \cdot \dfrac{L}{2} \cdot \sin\alpha$.

En effet, dans le triangle OGH, on a :

$$\sin\alpha = \frac{OH}{OG}, \text{ d'où } OH = OG \cdot \sin\alpha = \frac{L}{2} \cdot \sin\alpha.$$

- $\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}) = +F \cdot OH' = F \cdot OI \cdot \cos\alpha = F \cdot l \cdot \cos\alpha$; $\vec{F}$ fait tourner la poutre dans le sens positif.

- $\boldsymbol{\mathcal{M}_\Delta(\vec{R}) = 0}$, car le support de $\vec{R}$ passe par O.

Applications numériques :

$\mathcal{M}_\Delta(\vec{P}) = -0{,}1 \times 9{,}8 \times \dfrac{0{,}3}{2} \times \sin 30° = \boldsymbol{-0{,}074\ \mathrm{N} \cdot \mathrm{m}}$.

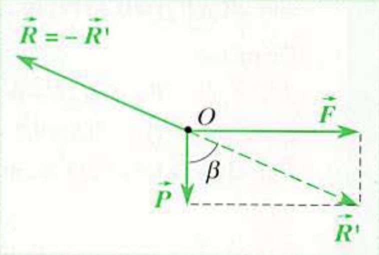
$\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}) = 0{,}43 \times 0{,}2 \times \cos 30° = \boldsymbol{+0{,}074\ \mathrm{N} \cdot \mathrm{m}}$.

3° La poutre étant en équilibre, nous avons aussi :

- $\vec{P}+\vec{F}+\vec{R}=\vec{0}$, soit $\vec{R}=-(\vec{P}+\vec{F})$.
- Les trois forces sont concourantes en K.

Traçons ces forces en O et notons $\vec{R'}$ la somme $\vec{P}+\vec{F}$: $\vec{R}=-\vec{R'}$.

Le théorème de Pythagore nous permet d'écrire : $P^2+F^2=R'^2$.



Or $P=m\,.\,g=0{,}1\times9{,}8=0{,}98$ N

et $F=0{,}43$ N,

donc $R'=\sqrt{0{,}98^2+0{,}43^2}=1{,}07$,

soit $\mathbf{R'=1{,}07}$ **N**.

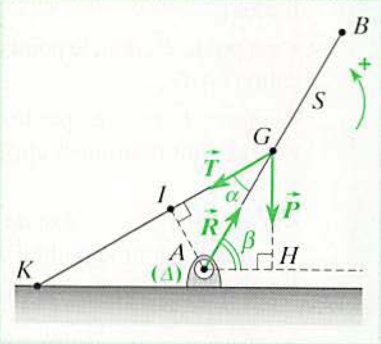
Par ailleurs :

$\tan\beta=\dfrac{F}{P}$, d'où $\boldsymbol{\beta}\mathbf{=23{,}7°}$.

5.7 Considérons comme système (S) le mât AB.

Les forces extérieures appliquées à (S) sont :

- le poids $\vec{P}$ du mât ;
- la tension $\vec{T}$ du fil ;
- la réaction $\vec{R}$ de l'axe.



La barre étant en équilibre, on a :

$$\vec{P}+\vec{T}+\vec{R}=\vec{0}\ (1)\ \text{ et }\ \mathcal{M}_\Delta(\vec{P})+\mathcal{M}_\Delta(\vec{T})+\mathcal{M}_\Delta(\vec{R})=0\ (2).$$

Les trois forces $\vec{P}$, $\vec{T}$, $\vec{R}$, de somme nulle, doivent être concourantes.

Or $\vec{P}$ et $\vec{T}$ étant concourantes en G, la réaction $\vec{R}$ a pour droite d'action AG et pour sens $\overrightarrow{AG}$.

1° Explicitons la relation (2) :

- $\mathcal{M}_\Delta(\vec{R})=0$ (la droite d'action rencontre l'axe).
- $\mathcal{M}_\Delta(\vec{P})=-P\,.\,AH=-P\,.\,l\,.\cos\beta$.
- $\mathcal{M}_\Delta(\vec{T})=T\,.\,AI=T\,.\,l\,.\sin\alpha$.

Donc $-P\,.\,l\,.\cos\beta+T\,.\,l\,.\sin\alpha=0$ (3), d'où $T=P\,.\,\dfrac{\cos\beta}{\sin\alpha}$.

Application numérique : $\boldsymbol{T}=20\times\dfrac{0{,}5}{0{,}5}=\mathbf{20}$ **N**.

2° Projetons la relation (1) sur la droite AB ; on obtient :

$$R - T \cdot \cos\alpha - P \cdot \sin\beta = 0,$$

d'où : $$R = T \cdot \cos\alpha + P \cdot \sin\beta = P \cdot \frac{\cos\beta}{\sin\alpha} \cdot \cos\alpha + P \cdot \sin\beta.$$

Or, d'après les valeurs numériques données :
$\sin\beta = \cos\alpha$ et $\cos\beta = \sin\alpha$.
L'expression de R se simplifie alors et on obtient : $R = 2P \cdot \cos\alpha$.

Application numérique : $\mathbf{R} = 2 \times 20 \times 0{,}866 = \mathbf{34{,}6\ N}$.

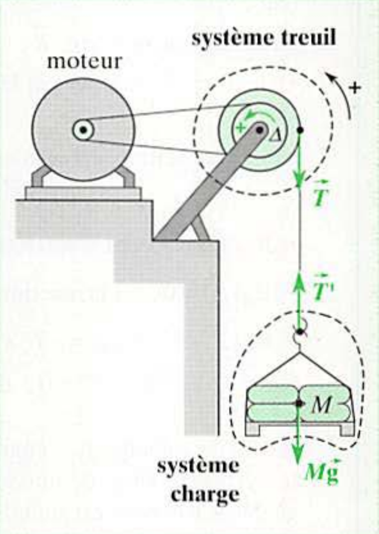
Remarque : la projection de (1) sur une droite orthogonale à AB, en G, nous donnerait $T \cdot \sin\alpha = P \cdot \cos\beta$; on retrouverait le résultat (3).

5.8 1° Choisissons comme système le treuil. Il est soumis :

- à la force $\vec{T}$ exercée par le filin auquel est accrochée la charge à soulever ;
- à des forces exercées par la courroie ;
- à la réaction d'axe.

Les moments de ces forces par rapport à l'axe de rotation sont, compte tenu du sens positif choisi :

- $\mathcal{M}_\Delta(\vec{T}) = -T \cdot \frac{D}{2}$;
- $\mathcal{M}_{\text{couple moteur}}$;
- $\mathcal{M}_\Delta(\vec{R}) = 0$, car la réaction rencontre l'axe.



■ La vitesse de rotation du treuil étant constante, le principe de l'inertie relatif à la rotation donne :

$$\mathcal{M}_\Delta(\vec{T}) + \mathcal{M}_{\text{couple moteur}} + \mathcal{M}_\Delta(\vec{R}) = 0, \text{ donc } -T \cdot \frac{D}{2} + \mathcal{M}_{\text{couple moteur}} = 0,$$

d'où $\mathcal{M}_{\text{couple moteur}} = T \cdot \frac{D}{2}$.

■ Il reste à calculer T. Le principe de l'inertie appliqué au système charge, en translation uniforme, donne :

$$\vec{T'} + m \cdot \vec{g} = \vec{0}, \text{ d'où } T' = m \cdot g.$$

D'où $\mathcal{M}_{\text{couple moteur}} = m \cdot g \cdot \frac{D}{2}$, $\boldsymbol{\mathcal{M}_{\text{couple moteur}}} = 200 \times 10 \times \frac{0{,}2}{2} = \mathbf{200\ N \cdot m}$.

2° Dans ce cas, on a :

$$\mathcal{M}_\Delta(\vec{T}) + \mathcal{M}_{\text{couple moteur}} + \mathcal{M}_\Delta(\vec{R}) + \mathcal{M}_{\text{frottement}} = 0\,.$$

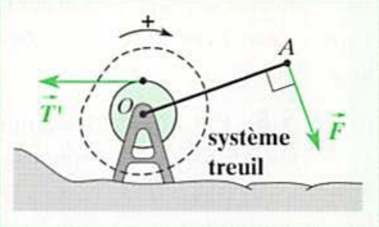
Le moment des forces de frottement est de signe opposé au moment du couple moteur ; il est donc égal à $-50\ \text{N}\,.\,\text{m}$.

Donc $-200 + \mathcal{M}_{\text{couple moteur}} - 50 = 0$,

d'où $\boldsymbol{\mathcal{M}_{\text{couple moteur}} = 250\ \text{N}\,.\,\text{m}}$.

5.9 1° Considérons le système treuil. Il est soumis :

- à la force $\vec{F}$ exercée par l'opérateur ;
- à la réaction de l'axe, $\vec{R}$;
- à la force $\vec{T'}$ exercée par le câble.



■ Lorsque le treuil est en rotation uniforme :

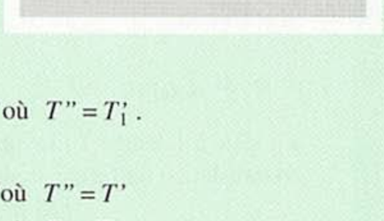
$$\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}) + \mathcal{M}_\Delta(\vec{R}) + \mathcal{M}_\Delta(\vec{T'}) = 0\,.$$

- $\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}) = F\,.\,OA = 400 \times 0{,}5$, donc $\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}) = 200\ \text{N}\,.\,\text{m}$.
- $\mathcal{M}_\Delta(\vec{R}) = 0$, car la réaction rencontre l'axe.
- $\mathcal{M}_\Delta(\vec{T'}) = -T'\,.\,R = -T' \times 0{,}1$.

Donc $200 - 0{,}1 \times T' = 0$, d'où $\boldsymbol{T' = 2\,000\ \text{N}}$.

■ Afin de calculer F_1, considérons le système câble, de masse négligeable. Ce dernier est soumis :

- à la force $\vec{T''} = -\vec{T'}$ exercée par le treuil ;
- à la force $\vec{T'_1}$ exercée par la voiture.



Le principe de l'inertie donne :

$$\vec{T''} + \vec{T'_1} = 0\,,\ \text{d'où}\ T'' = T'_1\,.$$

D'après le principe d'interaction :

$$\vec{T''} = -\vec{T'}\,,\ \text{d'où}\ T'' = T'$$

et

$$\vec{T'_1} = -\vec{F_1}\,,\ \text{d'où}\ F_1 = T'_1\,.$$

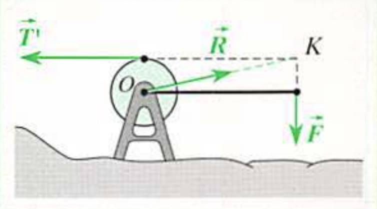
Donc $T' = T'' = T'_1 = F_1$, d'où $\boldsymbol{F_1 = 2\,000\ \text{N}}$.

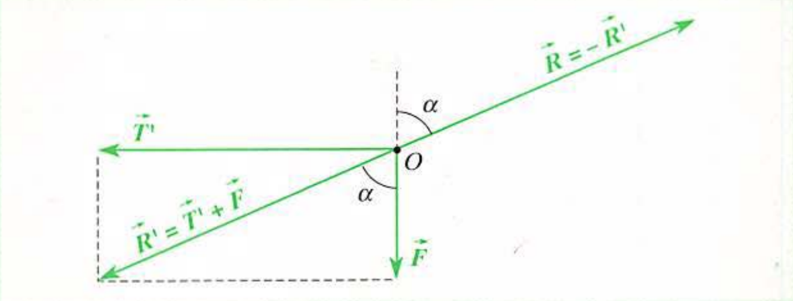
2° Le centre d'inertie du treuil étant fixe :

$$\vec{T'} + \vec{R} + \vec{F} = \vec{0} \quad (cf.\ \text{figure}).$$

Afin de déterminer $\vec{R}$, ramenons ces forces en O :

$\vec{R}$ est dessiné de façon quelconque sur la figure ci-dessous.





$\vec{R} = -(\vec{T'} + \vec{F})$. Notons $\vec{R'} = \vec{T'} + \vec{F}$. Donc $\vec{R} = -\vec{R'}$, d'où $R = R'$.

Le théorème de Pythagore donne :

$R^2 = F^2 + T'^2$, d'où $R = \sqrt{400^2 + 2\,000^2}$, soit $R = 2\,040\ \text{N}$.

Par ailleurs, $\tan \alpha = \dfrac{T'}{F} = \dfrac{2\,000}{400}$, d'où $\alpha = 78{,}7°$.

La réaction $\vec{R}$ a une valeur de 2 040 N et fait un angle de 78,7° avec la verticale.

Remarque : le solide en équilibre étant soumis à trois forces, celles-ci sont concourantes en K (*cf.* figure). Dans ce cas :

$$\tan \alpha = \frac{l}{R} = \frac{50}{10}\ ;\ \alpha = 78{,}69°.$$

6

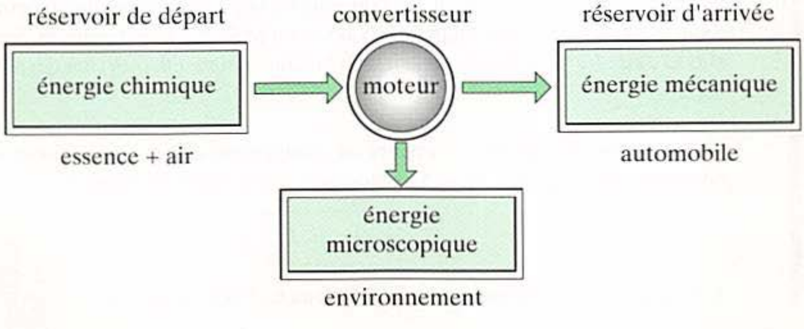
PRINCIPE DE CONSERVATION DE L'ÉNERGIE - TRANSFERTS D'ÉNERGIE

RÉSUMÉ DU COURS

Différentes sources et formes d'énergie

■ Il existe différentes sources d'énergie : sources fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel), sources nucléaires (uranium), sources renouvelables (vent, géothermie, biomasse, soleil).

L'énergie existe sous différentes formes : mécanique (cinétique, potentielle), chimique, … Il est souvent possible de faire passer de l'énergie d'une forme à une autre à l'aide de convertisseurs. Par exemple, le moteur d'une automobile transforme l'énergie chimique du mélange air-essence en énergie mécanique.


réservoir de départ
convertisseur
réservoir d'arrivée
énergie chimique
moteur
énergie mécanique
essence + air
automobile
énergie microscopique
environnement

■ L'unité internationale d'énergie est le joule (J). On utilise quelquefois le kilowattheure : $1\ \text{kW.h} = 3{,}6 \,.\, 10^6\ \text{J}$.

■ Si les transferts entre un système et les systèmes environnants sont impossibles, le système est isolé.

■ On pose comme principe : « **l'énergie totale d'un système isolé est constante** ».

Transferts d'énergie

Un transfert d'énergie peut s'effectuer sous forme de :

- travail mécanique, W_M ;
- travail électrique, W_E (dans un conducteur ohmique, $W_E = R \,.\, I^2 \,.\, \Delta t$) ;
- chaleur, Q ;
- rayonnement, W_R.

La puissance $\mathcal{P}$ caractérise la rapidité du transfert. À une énergie transférée W pendant la durée Δt, correspond la puissance :

$$\boxed{\mathcal{P} = \frac{W}{\Delta t}}$$

Unités : W en joule (J), Δt en seconde (s) et $\mathcal{P}$ en watt (W).

Convention de signe : l'énergie reçue par un système est comptée positivement, et l'énergie cédée est comptée négativement.

Transferts d'énergie par chaleur

■ La quantité de chaleur produisant une variation $(\theta_f - \theta_i)$ de la température d'un solide ou d'un liquide est donnée par :

$$\boxed{Q = m \,.\, c \,.\, (\theta_f - \theta_i)}$$

Unités : la masse du corps m en kilogramme (kg), la quantité de chaleur Q en joule (J), la capacité thermique massique c en joule par kilogramme et degré Celsius ($\text{J} \,.\, \text{kg}^{-1} \,.\, {}^\circ\text{C}^{-1}$), et la variation de la température $(\theta_f - \theta_i)$ en degré Celsius (°C).

■ La quantité de chaleur nécessaire au changement d'état d'une masse m d'un corps pur, sous une pression et à une température données, est égale à :

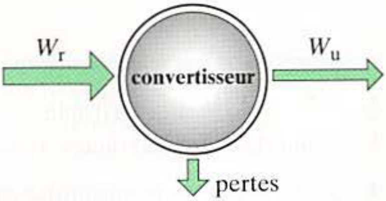
$$\boxed{Q = m \,.\, L}$$

L est la chaleur latente massique de changement d'état ($\text{J} \,.\, \text{kg}^{-1}$).

Rendement d'un convertisseur

Le rendement du convertisseur est défini par :

$$\boxed{\eta = \frac{W_u}{W_r}}$$



W_r est l'énergie reçue par le convertisseur et W_u l'énergie utile fournie par le convertisseur.
W_u et W_r sont des grandeurs considérées ici comme positives.

Sources et formes d'énergi

6.1 Centrale hydroélectrique

Une centrale hydroélectrique est située au bas d'un barrage.

1° Quelle source d'énergie utilise cette usine ? Est-ce une énergie renouvelable ?

2° Sous quelle forme est l'énergie de l'eau dans le barrage ?

3° Sous quelle forme se trouve l'énergie de l'eau arrivant sur les turbines ?

4° Quel est le convertisseur produisant du travail électrique ?

Chaîne énergétique

6.2 On considère la chaîne énergétique suivante :

$$\text{Soleil} \mapsto \text{photopile} \mapsto \text{moteur} \mapsto \text{eau à pomper.}$$

1° Schématiser la chaîne en indiquant les réservoirs d'énergie et les convertisseurs.

2° Sous quelles formes se trouve l'énergie dans les réservoirs ?

3° Indiquer la nature des transferts d'énergie.

Évaluation de transferts

6.3 Fusion de la glace

Calculer les quantités de chaleur produisant :

1° Une élévation de température de $80\ °\mathrm{C}$ d'un volume de $1\,500\ \mathrm{cm}^3$ d'eau

2° La fusion de $50\ \mathrm{g}$ de glace initialement à $0\ °\mathrm{C}$.

Données :

$c_{\text{eau}} = 4\,180\ \mathrm{J\,.\,kg^{-1}\,.\,°C^{-1}}$; $\rho_{\text{eau}} = 1\ \mathrm{g\,.\,cm^{-3}}$; $L_{\text{fusion}} = 330\ \mathrm{kJ\,.\,kg^{-1}}$.

6.4 Échauffement d'un cylindre d'aluminium

1° Quelle est la quantité de chaleur transférée par effet joule par une résistance de $4\ \Omega$ parcourue, pendant $10\ \mathrm{min}$, par un courant d'intensité $2\ \mathrm{A}$?

2° Cette résistance est noyée dans un cylindre d'aluminium, de masse $m = 150\ \text{g}$, de température initiale $20\ °\text{C}$. Quelle est la température finale du cylindre si ce dernier est parfaitement calorifugé (pas de pertes avec l'extérieur) ?

Donnée : $c_{\text{Al}} = 904\ \text{J}\,.\,\text{kg}^{-1}\,.\,°\text{C}^{-1}$.

♦ 6.5 Fusion de la glace

On mélange $m_1 = 100\ \text{g}$ d'eau à $\theta_1 = 20\ °\text{C}$ et $m_2 = 50\ \text{g}$ de glace à $\theta_2 = -10\ °\text{C}$.

Quels sont l'état et la température θ du système obtenu ?

Données :

$c_{\text{eau}} = 4{,}18\ \text{kJ}\,.\,\text{kg}\,.\,°\text{C}^{-1}$; $c_{\text{glace}} = 1{,}55\ \text{kJ}\,.\,\text{kg}\,.\,°\text{C}^{-1}$; $L_{\text{fusion}} = 330\ \text{kJ}\,.\,\text{kg}^{-1}$.

Calorimétrie

♦ **6.6** Dans un calorimètre, on place une masse $m_1 = 300\ \text{g}$ d'eau. La température d'équilibre est $\theta_1 = 18{,}5\ °\text{C}$. On ajoute $m_2 = 100\ \text{g}$ d'eau à $\theta_2 = 31\ °\text{C}$. La température finale est $\theta = 21{,}3\ °\text{C}$.

Quelle est la capacité thermique μ du vase calorimétrique et des accessoires ?

Donnée : $c_{\text{eau}} = 4{,}18\ \text{kJ}\,.\,\text{kg}\,.\,°\text{C}^{-1}$.

♦ **6.7** Un calorimètre de capacité thermique $\mu = 180\ \text{J}\,.\,\text{K}^{-1}$ contient une masse $m_1 = 300\ \text{g}$ d'eau. La température initiale d'équilibre est $\theta_1 = 19{,}8\ °\text{C}$. On y plonge un bloc de plomb, de masse $m_2 = 265\ \text{g}$, sortant d'une étuve à la température $\theta_2 = 95\ °\text{C}$. La température finale est $\theta_{\text{f}} = 21{,}5\ °\text{C}$.

Calculer la capacité thermique massique c du plomb.

Donnée : $c_{\text{eau}} = 4\,180\ \text{J}\,.\,\text{kg}^{-1}\,.\,°\text{C}^{-1}$.

Rendement

6.8 Un moteur électrique consomme une puissance $\mathcal{P}_{\text{E}} = 0{,}75\ \text{kW}$. Il produit une puissance mécanique utile $\mathcal{P}_{\text{u}} = 0{,}6\ \text{kW}$. Les pertes par effet joule $\mathcal{P}_{\text{J}}$ sont évaluées à $0{,}1\ \text{kW}$.

1° Y a-t-il d'autres pertes possibles ? Si oui, déterminer celles-ci.

2° Calculer le rendement énergétique de ce moteur.

CORRIGÉS DES EXERCICES

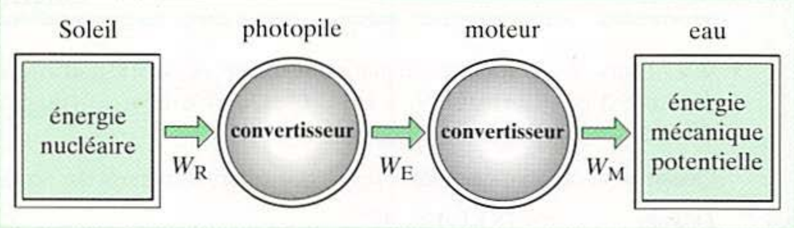
6.1 1° L'usine utilise de l'énergie hydraulique qui est une source d'énergie renouvelable **grâce à l'énergie rayonnante du Soleil**.

2° Dans le barrage, l'eau possède de l'**énergie potentielle** de pesanteur (forme d'énergie mécanique).

3° Arrivant sur les turbines, l'eau possède de l'**énergie cinétique** (forme d'énergie mécanique).

4° C'est l'**alternateur**, couplé à la turbine, qui produit du travail électrique. On dit aussi, improprement, de l'énergie électrique.

6.2 1° La chaîne comporte deux réservoirs et deux convertisseurs (*cf.* schéma ci-dessous).



2° Le Soleil est un réservoir d'**énergie nucléaire** ; l'eau pompée, un réservoir d'**énergie mécanique potentielle**.

3° ▪ Entre le Soleil et la photopile : **rayonnement**.
▪ Entre la photopile et le moteur : **travail (énergie) électrique**.
▪ Entre le moteur et l'eau : **travail mécanique.**

6.3 1° La masse de 1 500 cm^3 qui équivaut à 1,5 L d'eau est $m = 1{,}5$ kg.
La quantité de chaleur est donnée par :
$Q = m\,.\,c\,.\,(\theta_f - \theta_i)$, d'où $Q = 1{,}5 \times 4\,180 \times 80 = 501\,600$ J $=$ **501,6 kJ**.

2° $Q = m\,.\,L_f$; or $m = 50$ g $= 0{,}05$ kg, d'où $Q = 0{,}050 \times 330 =$ **16,5 kJ**.

6.4 1° La quantité de chaleur est donnée par :
$W_E = Q = R\,.\,I^2\,.\,\Delta t$, avec $R = 4\ \Omega$, $I = 2$ A, $\Delta t = 10$ min $= 600$ s.
Donc $Q = 4 \times 2^2 \times 600 =$ **9 600 J**.

2° Cette quantité de chaleur élève la température du bloc d'aluminium :
$Q = m\,.\,c\,.\,(\theta_f - \theta_i)$, donc $9\,600 = 150 \times 0{,}904\,(\theta_f - \theta_i)$,

d'où $\theta_f - \theta_i = 70{,}8\ °\text{C}$;
or $\theta_i = 20\ °\text{C}$, donc $\theta_f = 70{,}8 + 20 = 90{,}8\ °\text{C}$, soit $\boldsymbol{\theta_f = 90{,}8\ °\text{C}}$.

6.5 Faisons l'hypothèse qu'il reste encore de la glace ; dans ce cas, la température d'équilibre θ sera égale à $0\ °\text{C}$. Soit m la masse de glace fondue ($m < m_2$).

- L'énergie transférée par l'eau est : $Q_1 = m_1 \,.\, c_{\text{eau}} \,.\, (\theta - \theta_1) = -m_1 \,.\, c_{\text{eau}} \,.\, \theta_1$.
- L'énergie transférée par la glace est : $Q_2 = m_2 \,.\, c_{\text{glace}} \,.\, (\theta - \theta_2) + m \,.\, L_f$.
- La conservation de l'énergie donne : $Q_1 + Q_2 = 0$.

Donc $m_1 \,.\, c_{\text{eau}} \,.\, \theta_1 - m_2 \,.\, c_{\text{glace}}\, \theta_2 + m \,.\, L_f = 0$,
d'où $-0{,}1 \times 4\,180 \times 20 - 0{,}05 \times 1\,550\,(-10) + m \,.\, 330 \,.\, 10^3 = 0$.

On trouve : $m = 0{,}023\ \text{kg} = 23\ \text{g}$, soit $m < 50\ \text{g}$; l'hypothèse est convenable.
À l'équilibre, on trouve $100 + 23 = 123\ \text{g}$ d'eau et $50 - 23 = 27\ \text{g}$ de glace.

La température finale est égale à $\mathbf{0\ °C}$.

6.6 L'énergie transférée par le calorimètre et la masse m_1 d'eau qu'il contient est : $Q_1 = (\mu + m_1 \,.\, c_{\text{eau}})(\theta - \theta_1)$.

- L'énergie transférée par la masse m_2 d'eau est : $Q_2 = m_2 \,.\, c_{\text{eau}} \,.\, (\theta - \theta_2)$.
- La conservation de l'énergie pour le système isolé, le calorimètre, donne :

$Q_1 + Q_2 = 0$, donc $(\mu + m_1 \,.\, c_{\text{eau}})(\theta - \theta_1) + m_2 \,.\, c_{\text{eau}} \,.\, (\theta - \theta_2) = 0$,
d'où $(\mu + 0{,}3 \times 4\,180)(21{,}3 - 18{,}5) + 0{,}1 \times 4\,180\,(21{,}3 - 31) = 0$,
soit $\boldsymbol{\mu = 194\ \text{J} \,.\, \text{K}^{-1}}$.

6.7
- L'énergie transférée par le calorimètre et la masse m_1 d'eau qu'il contient est : $Q_1 = (\mu + m_1 \,.\, c_{\text{eau}})(\theta_f - \theta_1)$.
- L'énergie transférée par le bloc de plomb est : $Q_2 = m_2 \,.\, c_{\text{plomb}} \,.\, (\theta_f - \theta_2)$.
- La conservation de l'énergie pour le système isolé calorimètre donne :

$Q_1 + Q_2 = 0$, donc $c_{\text{plomb}} = -\dfrac{(\mu + m_1 \,.\, c_{\text{eau}})(\theta_f - \theta_1)}{m_2(\theta_f - \theta_2)}$,

d'où $\boldsymbol{c_{\text{plomb}} = 125\ \text{J} \,.\, \text{kg}^{-1} \,.\, °\text{C}^{-1}}$.

6.8 1° $0{,}75 > 0{,}6 + 0{,}1$; $\mathcal{P}_E > \mathcal{P}_u + \mathcal{P}_J$.
Le principe de conservation de l'énergie indique donc qu'**il y a d'autres pertes**, frottements par exemple, de puissance :
$\mathcal{P}_p = \mathcal{P}_E - (\mathcal{P}_u + \mathcal{P}_J)$, d'où $\mathcal{P}_p = 0{,}75 - (0{,}6 + 0{,}1) = \mathbf{0{,}05\ kW}$.

2° $\eta = \dfrac{\mathcal{P}_u}{\mathcal{P}_E} = \dfrac{0{,}6}{0{,}75}$, d'où $\boldsymbol{\eta = 0{,}8}$.

7

ÉNERGIE MÉCANIQUE D'UN SYSTÈME

RÉSUMÉ DU COURS

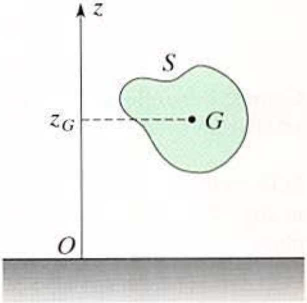
Énergie potentielle

- Soit un solide S de masse m, de centre de gravité G (ou centre d'inertie) ; l'axe Oz est un axe vertical ascendant.

L'énergie potentielle de pesanteur du système déformable {Terre - solide} est définie par :

$$\boxed{\mathscr{E}_{\mathrm{P}} = m \,.\, \mathrm{g} \,.\, z_G}$$

Unités : la masse m en kilogramme (kg), l'intensité de la pesanteur g en newton par kilogramme ($\mathrm{N\,.\,kg^{-1}}$) et l'altitude z_G de G en mètre (m).



- La valeur de l'énergie potentielle dépend du choix de l'origine sur l'axe Oz.

L'énergie potentielle de pesanteur d'un système est définie à une constante additive près.

Cette propriété est sans conséquence sur la valeur d'une variation de l'énergie potentielle.

Énergie cinétique

■ L'énergie cinétique d'un solide en translation est égale au demi-produit de sa masse par le carré de sa vitesse :

$$\boxed{\mathscr{E}_K = \frac{1}{2} m \cdot v^2}$$

Unités : $\mathscr{E}_K$ en joule (J), m en kilogramme (kg) et v en mètre par seconde ($m \cdot s^{-1}$).

■ Une force appliquée à un solide en translation, et non orthogonale au vecteur vitesse, modifie l'énergie cinétique de ce solide.

■ Une force appliquée à un solide en translation, orthogonale au vecteur vitesse, ne modifie pas l'énergie cinétique de ce solide.

Énergie mécanique

■ L'énergie mécanique $\mathscr{E}_M$ d'un système est égale à la somme de son énergie cinétique et de son énergie potentielle :

$$\boxed{\mathscr{E}_M = \mathscr{E}_K + \mathscr{E}_P}$$

■ Pour un solide en translation, l'énergie mécanique du système {Terre - solide} dans le référentiel terrestre est donnée par :

$$\boxed{\mathscr{E}_M = \frac{1}{2} m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot z_G}$$

Comme l'énergie potentielle, l'énergie mécanique est définie à une constante additive près.

■ Dans le vide ou, approximativement, tant que les frottements de l'air sont négligeables, l'énergie mécanique se conserve au cours d'une chute libre d'un objet.

DES EXERCICES ■

Dans tous les exercices, on prendra $g = 9{,}8\ \mathrm{N \cdot kg^{-1}}$ *pour la valeur de l'intensité de la pesanteur.*

Énergie cinétique de translation

7.1 1° Donner l'expression de l'énergie cinétique d'un solide animé d'un mouvement de translation ; préciser les unités.

2° Lors d'un service, le record de vitesse d'une balle de tennis est de $248\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$. Sachant que la balle a une masse de 58 g, quelle est son énergie cinétique ?

3° Une Twingo, de masse 960 kg, passe de 0 à $100\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$ en 13,1 s. Calculer la variation de son énergie cinétique.

Énergie potentielle de pesanteur

7.2 Automobile

Une Clio, de masse 1,2 t, est stationnée à Chamonix à l'altitude de 1 008 m. Calculer l'énergie potentielle de pesanteur du système {Terre - Clio} en prenant successivement pour origine de l'axe vertical ascendant, le niveau :

1° de la mer ; 2° de Chamonix ;

3° du sommet du Mont-Blanc (altitude : 4 807 m).

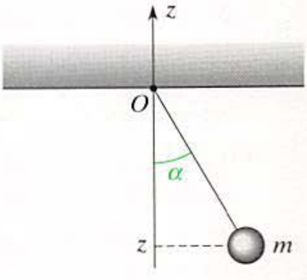
♦ 7.3 Pendule simple

Un pendule simple est constitué par une petite sphère en acier de masse m attachée à une extrémité d'un fil inextensible et sans masse de longueur L.
L'autre extrémité du fil est fixée en un point O d'un support.
Le pendule est écarté, fil tendu, d'un angle α de sa position d'équilibre verticale (*cf.* figure).

1° On prend pour origine de l'axe vertical ascendant, le niveau du plan horizontal passant par O. Quelle est l'énergie potentielle initiale du système {Terre - pendule} ?

2° Calculer la variation d'énergie potentielle du système quand le pendule, partant de cette position, passe par la position verticale.

Données : $m = 100$ g ; $\alpha = 30°$; $L = 50$ cm.



Calculs d'énergies mécaniques

♦ 7.4 Engin ultraléger motorisé (U.L.M.)

Lors du décollage d'un U.L.M., on étudie le système {Terre - U.L.M.} dans le référentiel terrestre.

1° L'énergie cinétique du système est égale à $\frac{1}{2}m \cdot v^2$. Que représentent m et v, sachant que l'U.L.M. a un mouvement de translation ?

2° On étudie maintenant l'énergie potentielle du système {Terre - U.L.M.}. L'origine de l'axe vertical ascendant est prise au niveau du sol.

a) Pourquoi est-il nécessaire de préciser l'origine de l'axe ?

b) Comment varie l'énergie potentielle de pesanteur du système au cours du décollage de l'U.L.M. ?

c) Donner l'expression de cette énergie potentielle ; préciser les unités.

3° *a*) Donner l'expression de l'énergie mécanique du système.

b) Calculer l'énergie mécanique du système.

Données :
$v = 50\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; $m = 150\ \text{kg}$; altitude par rapport au sol = 80 m.

7.5 Avion solaire

Le 7 juillet 1981, eut lieu la première traversée de la Manche par un avion solaire, le « Solar Challenger ».
Cet avion, de masse $m = 180$ kg, d'envergure $L = 14{,}3$ m, équipé de 16 128 cellules solaires, a volé à l'altitude maximale de 3 353 m à la vitesse maximale de $60\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$.
Calculer dans le référentiel terrestre, pour le système {Terre - avion} :

1° l'énergie cinétique maximale ;

2° l'énergie potentielle à l'altitude indiquée ;

3° l'énergie mécanique.

Conservation de l'énergie mécanique

♦ **7.6** Un pot de fleurs tombe en chute libre. Les frottements de l'air sont négligeables. Le référentiel d'étude est le référentiel terrestre.

1° Donner l'expression littérale de l'énergie mécanique du système {Terre - pot de fleurs}.

2° Quelle est la propriété de l'énergie mécanique du système au cours de la chute ?

3° Le pot tombe du deuxième étage d'un immeuble. La hauteur de chute est de 7 m . Calculer la vitesse du pot lorsqu'il touche le sol.

♦♦ **7.7** Une bille d'acier, de masse $m =$ 120 g , est lancée avec la vitesse $v_A = 10\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ verticalement vers le haut à partir d'un point A .
Ce point A est situé à l'altitude $z_A = 1{,}5\ \text{m}$ au-dessus du sol.
Le référentiel d'étude est le référentiel terrestre.

1° Calculer la valeur de l'énergie mécanique initiale du système {Terre - bille} en prenant le sol pour origine de l'axe vertical ascendant.

2° En admettant que l'énergie mécanique se conserve, calculer l'altitude maximale atteinte par la bille.

3° Quelle sera la vitesse de la bille lorsqu'elle touchera le sol ?

4° La vitesse réelle sera-t-elle supérieure ou inférieure à la vitesse calculée précédemment ?

Puissance d'une pompe

♦♦ **7.8** Une pompe refoule de l'eau dans un réservoir situé à 5 m au-dessus d'elle. Son débit est de $30\ \text{L} \cdot \text{min}^{-1}$.

1° Quelle est la variation d'énergie potentielle du système {Terre - eau} après une minute de pompage ?

Donnée : masse volumique de l'eau = $1\ \text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$.

2° *a*) Sachant que l'énergie correspondant à cette variation d'énergie potentielle est fournie par un moteur, calculer la puissance minimale du moteur.

b) Pourquoi cette puissance est-elle qualifiée de minimale ?

CORRIGÉS DES EXERCICES

7.1 1° $\mathscr{E}_K = \frac{1}{2} m \,.\, v^2$; $\mathscr{E}_K$ en joule (J), m en kg et v en $\mathrm{m\,.\,s^{-1}}$.

2° $m = 58\ \mathrm{g} = 0{,}058\ \mathrm{kg}$;

$v = 248\ \mathrm{km\,.\,h^{-1}} = \frac{248 \times 1\,000}{3\,600}\ \mathrm{m\,.\,s^{-1}}$, d'où $v = \frac{248}{3{,}6} = 68{,}9\ \mathrm{m\,.\,s^{-1}}$.

Donc : $$\mathscr{E}_K = \frac{1}{2} m \,.\, v^2 = \mathbf{137{,}7\ J}.$$

3° L'énergie cinétique initiale $\mathscr{E}_{K_0}$ de la Twingo est nulle.
À $100\ \mathrm{km\,.\,h^{-1}}$, l'énergie cinétique est égale à :

$$\mathscr{E}_{K_1} = \frac{1}{2} \times 960 \times \left(\frac{100}{3{,}6}\right)^2 = 3{,}7\,.\,10^5, \text{ soit } \mathscr{E}_{K_1} = 3{,}7\,.\,10^5\ \mathrm{J}.$$

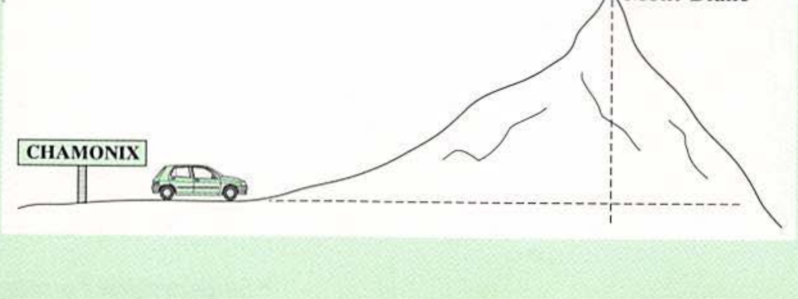
La variation d'énergie cinétique est donc égale à : $\mathbf{\mathscr{E}_{K_1} - \mathscr{E}_{K_0} = 3{,}7\,.\,10^5\ J}$.

7.2 1° Par définition, l'énergie potentielle du système {Terre - solide} avec m la masse du solide, g l'intensité de la pesanteur, et z_G l'altitude du centre de gravité du solide, est : $\mathscr{E}_P = m\,.\,\mathrm{g}\,.\,z_G$.
Donc $\mathscr{E}_P = 1\,200 \times 9{,}8 \times 1\,008 = \mathbf{11{,}85\,.\,10^6\ J}$.

2° $\mathbf{\mathscr{E}_P = 0}$**, car** $\mathbf{z_G = 0}$.

3° La différence d'altitude entre le sommet du Mont-Blanc et Chamonix est égale à : $4\,807 - 1\,008 = 3\,799\ \mathrm{m}$.
Donc, par rapport au sommet du Mont-Blanc (*cf.* figure), Chamonix est à « l'altitude » : $z_G = -3\,799\ \mathrm{m}$.
D'où $\mathscr{E}_P = 1\,200 \times 9{,}8 \times (-3\,799) = -44{,}67\,.\,10^6$,
soit $\mathbf{\mathscr{E}_P = -44{,}67\,.\,10^6\ J}$.

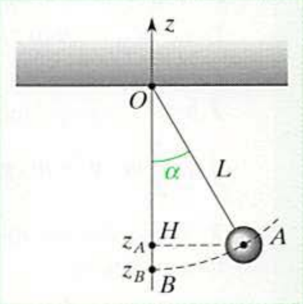
Nous constatons que la valeur de l'énergie potentielle dépend du choix de l'origine sur l'axe vertical ascendant.



7.3 1° $\mathscr{E}_{P_1} = m \,.\, g \,.\, z_A$. Le système étudié est le système {Terre - bille}.
$z_A < 0$; $z_A = -OH$.

Dans le triangle rectangle OHA : $\cos \alpha = \frac{OH}{OA} = \frac{OH}{L}$ d'où $OH = L \,.\, \cos \alpha$.

Donc $\mathscr{E}_{P_1} = -m \,.\, g \,.\, L \,.\, \cos \alpha$.



2° Lorsque le pendule passe par la position verticale, la bille est en B ; l'énergie potentielle du système étudié vaut :

$\mathscr{E}_{P_2} = m \,.\, g \,.\, z_B = -m \,.\, g \,.\, L$.

La variation d'énergie potentielle vaut donc :

$$\begin{aligned} \Delta\mathscr{E}_P &= \mathscr{E}_{P_2} - \mathscr{E}_{P_1} \\ &= -m \,.\, g \,.\, L - (-m \,.\, g \,.\, L \,.\, \cos \alpha) \\ &= m \,.\, g \,.\, L (\cos \alpha - 1). \end{aligned}$$

D'où $\Delta\mathscr{E}_P = 0{,}1 \times 9{,}8 \times 0{,}5 \times (\cos 30 - 1) = -0{,}065\,6$,
soit $\mathbf{\Delta\mathscr{E}_P = -0{,}065\,6\ J}$.

7.4 1° Dans le référentiel terrestre, l'énergie cinétique de la Terre est nulle. L'énergie cinétique du système étudié est donc $\mathscr{E}_K = \frac{1}{2} m \,.\, v^2$, où ***m*** **représente la masse de l'U.L.M. et** ***v*** **sa vitesse**.

2° *a*) L'énergie potentielle dépend du choix de l'origine de l'axe vertical ascendant : **l'énergie potentielle d'un système est définie à une constante additive près**.

b) Au cours du décollage, **l'énergie potentielle de pesanteur augmente car l'altitude du centre d'inertie de l'U.L.M croît**.

c) $\mathscr{E}_P = m \,.\, g \,.\, z_G$; $\mathscr{E}_P$ en joule (J), m en kg, g en $N \,.\, kg^{-1}$ et z_G en m.

3° *a*) $\mathscr{E}_M = \mathscr{E}_K + \mathscr{E}_P = \frac{1}{2} m \,.\, v^2 + m \,.\, g \,.\, z_G$, d'où $v = \frac{50}{3{,}6} \approx \mathbf{13{,}9\ m \,.\, s^{-1}}$.

b) $\mathscr{E}_M = \frac{1}{2} \times 150 \times (13{,}9)^2 + 150 \times 9{,}8 \times 80 = 132\,090{,}75$,

soit $\mathbf{\mathscr{E}_M \approx 132\,091\ J}$.

7.5 1° L'énergie cinétique d'un solide en translation est : $\mathscr{E}_K = \frac{1}{2} m \,.\, v^2$.

$v = \frac{60}{3{,}6} = 16{,}7\ m \,.\, s^{-1}$.

Donc $\mathscr{E}_K = \frac{1}{2} \times 180 \times 16{,}7^2 = 25\,100$, soit $\mathbf{\mathscr{E}_K = 25\,100\ J}$.

2° L'énergie potentielle de pesanteur du système {Terre - avion} est :

$$\mathscr{E}_P = 180 \times 9{,}8 \times 3\,353 = 5{,}915 \,.\, 10^6 ,$$

soit $\boldsymbol{\mathscr{E}_P = 5{,}915 \,.\, 10^6\ \mathrm{J}}$.

3° $\mathscr{E}_M = \mathscr{E}_P + \mathscr{E}_K$, avec $\mathscr{E}_K\,(\text{Terre}) = 0$ dans le référentiel terrestre.

Donc $\boldsymbol{\mathscr{E}_M = 5{,}940 \,.\, 10^6\ \mathrm{J}}$.

7.6 1° L'énergie mécanique du système {Terre - pot} s'écrit :

$\boldsymbol{\mathscr{E}_M = \frac{1}{2} m \,.\, v^2 + m \,.\, g \,.\, z_G}$, où z_G est l'altitude du centre de gravité du pot.

2° L'énergie mécanique est **constante** dans la mesure où la résistance de l'air est négligée.

3° Au départ : $v_1 = 0$; $z_1 = 7\ \mathrm{m}$; $\mathscr{E}_{P_1} = m \,.\, g \,.\, z_1$; $\mathscr{E}_{K_1} = 0$.

Juste avant le contact avec le sol : $z_2 = 0$; $\mathscr{E}_{K_2} = \frac{1}{2} m \,.\, v_2^2$; $\mathscr{E}_{P_2} = 0$.

Écrivons que l'énergie mécanique du système n'a pas varié entre les positions 1 et 2 :

$$\mathscr{E}_{M_1} = \mathscr{E}_{M_2}, \text{ soit } m \,.\, g \,.\, z_1 = \frac{1}{2} m \,.\, v_2^2 .$$

Donc $v_2^2 = 2g \,.\, z_1$, soit $\boldsymbol{v_2 = 11{,}7\ \mathrm{m \,.\, s^{-1}}}$.

Remarquons que la masse n'intervient pas dans l'expression de la vitesse, car l'énergie mécanique du système se conserve.

7.7 1° $\mathscr{E}_{M_1} = \frac{1}{2} \times 0{,}120 \,.\, 10^2 + 0{,}120 \times 9{,}8 \times 1{,}5$,

soit $\boldsymbol{\mathscr{E}_{M_1} = 7{,}764\ \mathrm{J}}$.

2° Au sommet B de sa trajectoire verticale, la bille a une vitesse nulle : $\mathscr{E}_{K_B} = 0$.
$\mathscr{E}_{M_2} = m \,.\, g \,.\, z_B$ et $\mathscr{E}_{M_2} = \mathscr{E}_{M_1}$, d'où $7{,}764 = 0{,}12 \times 9{,}8 \times z_B$,
soit $\boldsymbol{z_B = 6{,}6\ \mathrm{m}}$.

3° Au sol, $z_S = 0$ et $\mathscr{E}_{P_S} = 0$.

Donc $\mathscr{E}_{M_3} = \frac{1}{2} m \,.\, v_S^2$.

$\mathscr{E}_{M_3} = \mathscr{E}_{M_1}$, donc $\boldsymbol{v_S = 11{,}4\ \mathrm{m \,.\, s^{-1}}}$.

4° La vitesse est certainement **plus petite,** car il y a, au cours de la chute dissipation d'énergie à cause des forces de frottements exercées par l'air sur la bille.

7.8 1° Le système étudié est le système $\{\text{Terre - eau}\}$.
Chaque minute, la variation d'énergie potentielle est : $\Delta\mathscr{E}_\text{P} = \Delta m \,.\, g \,.\, z$.

1 L d'eau, soit 1 dm^3 d'eau, a une masse de 1 kg.

Donc $\Delta m = 30\ \text{kg}$, d'où $\Delta\mathscr{E}_\text{P} = 30 \times 9{,}8 \times 5 = \mathbf{1\,470\ J}$.

2° *a*) Cette énergie de 1 470 J est fournie pendant chaque minute :

$$\mathscr{P} = \frac{\Delta\mathscr{E}_\text{P}}{\Delta t},$$

d'où $\mathscr{P} = \dfrac{\mathbf{1\,470}}{\mathbf{60}} = \mathbf{24{,}5\ W}$.

b) La puissance calculée en *a*) est qualifiée de minimale, car on doit ajouter à cette puissance la puissance liée à l'énergie cinétique de l'eau refoulée et la puissance des pertes sous forme de chaleur dans le moteur et dans la pompe. Le moteur doit donc avoir une puissance **au moins** égale à 24,5 W, mais **dans la réalité**, elle est bien supérieure.

8

BILAN ÉNERGÉTIQUE - TRAVAIL D'UNE FORCE

RÉSUMÉ DU COURS

Système isolé

■ L'énergie $\mathscr{E}$ d'un système est la somme de son énergie mécanique $\mathscr{E}_M$ et de son énergie microscopique U_{mic} :

$$\boxed{\mathscr{E} = \mathscr{E}_M + U_{mic} = \mathscr{E}_K + \mathscr{E}_P + U_{mic}}$$

L'énergie d'un système isolé est constante.

■ Pour un système isolé dans lequel **il n'y a pas de frottement** :

- l'énergie mécanique $\mathscr{E}_M$ est constante,
- l'énergie microscopique U_{mic} est constante.

Donc, si $\mathscr{E}_M = C^{te}$, on en déduit :

$\Delta\mathscr{E}_M = 0$, soit $\Delta\mathscr{E}_K + \Delta\mathscr{E}_P = 0$, d'où $\Delta\mathscr{E}_K = -\Delta\mathscr{E}_P$.

La variation d'énergie cinétique est égale à l'opposé de la variation d'énergie potentielle.

■ Pour un système isolé dans lequel **il y a des frottements** :

- l'énergie mécanique varie,
- l'énergie microscopique varie.

Donc, puisque $\mathscr{E} = \mathscr{E}_M + U_{mic} = C^{te}$, on en déduit :
$\Delta\mathscr{E} = 0$, soit $\Delta\mathscr{E}_M + \Delta U_{mic} = 0$, d'où $\Delta\mathscr{E}_M = -\Delta U_{mic}$.
La variation d'énergie mécanique est égale à l'opposé de la variation d'énergie microscopique.

Système non isolé, travail d'une force constante

🟩 La variation d'énergie d'un système qui ne reçoit que du travail est égale au travail fourni par l'extérieur : $\Delta\mathscr{E} = W$.

S'il n'y a pas de frottement :
$\Delta U_{mic} = 0$ et $\Delta\mathscr{E} = \Delta\mathscr{E}_M + \Delta U_{mic} = \Delta\mathscr{E}_M$, d'où $\Delta\mathscr{E}_M = W$.

Dans le cas où il n'y a pas de frottement, la variation d'énergie mécanique d'un système qui ne reçoit que du travail est égale au travail fourni par l'extérieur.

🟩 Soit $\vec{F}$ une force constante appliquée à un solide.

- Si le point d'application de cette force se déplace dans la même direction et le même sens que $\vec{F}$, d'une distance d, le travail effectué par cette force est :

$$\boxed{W(\vec{F}) = F \cdot d}$$

Ce travail est positif ; il est dit moteur.

- Si le point d'application se déplace dans la même direction, mais dans le sens opposé à $\vec{F}$:

$$\boxed{W(\vec{F}) = -F \cdot d}$$

Ce travail est négatif ; il est dit résistant.

- Si le point d'application se déplace perpendiculairement à la direction de $\vec{F}$:

$$\boxed{W(\vec{F}) = 0}$$

Unités : W se mesure en joule (J), avec F en newton (N) et d en mètre (m).

Système isolé avec frottement

Lorsque l'énergie mécanique d'un système isolé diminue, la variation d'énergie mécanique, opposée à la variation d'énergie microscopique, est égale au travail des forces de frottement internes au système.

Conservation de l'énergie mécanique

♦♦ 8.1 Chute libre

Un ouvrier laisse tomber un marteau d'un échafaudage situé à 8 m au-dessus du sol.

1° *a*) Le système {Terre - air - marteau} est-il isolé ? Pourquoi ?

b) Comment varie l'énergie de ce système ?

2° On fait l'hypothèse que les frottements sont négligeables.

a) Comment varie l'énergie microscopique du système ?

b) Comment varie l'énergie mécanique du système ?

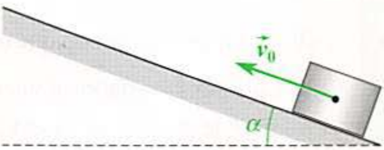
c) Quelle est la relation entre la variation d'énergie cinétique et la variation d'énergie potentielle du système ?

3° En déduire, dans les conditions précédentes, avec quelle vitesse le marteau touche le sol.

Donnée : $g = 10\ \mathrm{N.kg^{-1}}$.

8.2 Mouvement d'un palet autoporteur

Un palet autoporteur est lancé avec la vitesse $v_0 = 1{,}8\ \mathrm{m.s^{-1}}$ vers le haut, suivant la ligne de plus grande pente d'un plan incliné d'un angle $\alpha = 10°$ par rapport à l'horizontale (*cf.* figure).
On fait l'hypothèse de négliger toute force de frottement.



1° *a*) Le système {Terre - palet - table - air} est-il isolé juste après le lancement du palet ? Justifier.

b) Quelle est la caractéristique de l'énergie de ce système ?

2° *a*) Quel est le dispositif qui rend les frottements négligeables ?

b) Quelle est la relation entre la variation d'énergie cinétique et la variation d'énergie potentielle ?

3° *a*) En déduire la dénivellation maximale atteinte par le palet.

b) Quelle distance parcourt le palet avant de redescendre ?

Donnée : $g = 9{,}8\ \mathrm{N.kg^{-1}}$.

Non-conservation de l'énergie mécanique

♦♦ 8.3 Descente d'un skieur

Un skieur effectue une descente sur une piste de 700 m de dénivelé. La masse du skieur équipé est $m = 90$ kg.

1° Le système {Terre - air - skieur} est-il isolé ? Comment varie l'énergie de ce système au cours de la descente ?

2° À l'arrivée, sa vitesse est de $108\ \text{km.h}^{-1}$.

a) Montrer que la variation d'énergie cinétique du système est différente de l'opposé de la variation d'énergie potentielle. *Donnée :* $g = 10\ \text{N.kg}^{-1}$.

b) Que peut-on conclure de ce résultat ?

3° Calculer la variation d'énergie microscopique du système.

♦ 8.4 Chute d'un parachutiste

Un parachutiste saute à partir d'un hélicoptère en vol stationnaire situé à 2 000 m d'altitude. Il n'ouvre pas son parachute immédiatement, mais sa vitesse se stabilise à $180\ \text{km.h}^{-1}$. À 400 m au-dessus du sol, il ouvre alors son parachute et arrive sur le sol avec une vitesse de $6\ \text{m.s}^{-1}$. Le parachutiste équipé a une masse $m = 93$ kg. *Donnée :* $g = 10\ \text{N.kg}^{-1}$.

1° Caractériser l'énergie du système {Terre - air - parachutiste}.

2° L'énergie mécanique du système est-elle constante au cours du saut ? Justifier.

3° L'énergie microscopique du système est-elle constante ? Justifier.

4° Calculer la variation d'énergie microscopique du système :

a) entre le début du saut et l'instant où le parachutiste décide d'ouvrir son parachute ;

b) entre l'ouverture du parachute et l'arrivée sur le sol.

Travail d'une force constante

8.5 Travail du poids

Un ascenseur a une masse de 1 tonne. Calculer le travail du poids de l'ascenseur lorsque ce dernier :

1° Descend du 10^{e} étage au rez-de-chaussée (dénivellation : 35 m).

2° Remonte du rez-de-chaussée au 3^{e} étage (dénivellation : 12 m).
Donnée : $g = 10\ \text{N.kg}^{-1}$.

8.6 Travail d'une force

Une voiture « Twingo », de masse $m = 940$ kg , roule en ligne droite sur une route horizontale, à la vitesse $v = 72 \text{ km.h}^{-1}$.

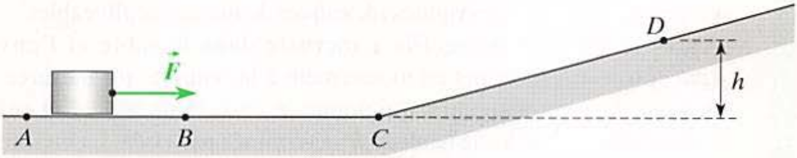
1° Les forces de frottement sont équivalentes à une force parallèle au déplacement, de sens contraire à celui-ci. On évalue à 800 N l'intensité de cette force.
Calculer le travail effectué par cette force de frottement pendant chaque seconde.

2° Calculer le travail effectué par le poids de l'automobile pendant chaque seconde.

3° Calculer la puissance développée par le moteur pour maintenir cette vitesse constante.

♦ 8.7 Lancement d'un mobile avec une force constante

Un solide de masse m peut se déplacer sans frottement sur une piste, comme le montre la figure ci-dessous. Il est soumis, sur la portion AB , à l'action d'une force constante $\vec{F}$ horizontale.



1° *a*) Calculer, dans le référentiel terrestre, la variation d'énergie mécanique du système {Terre - solide} entre A et B .
Données : $AB = 1$ m ; $F = 100$ N ; $m = 5$ kg ; $g = 10 \text{ N.kg}^{-1}$.

b) En déduire la vitesse du solide en B .

2° Quelle est la vitesse du solide en C ?

3° De quelle hauteur h le solide peut-il ensuite s'élever ?

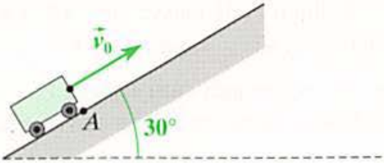
Mise en évidence des forces de frottement

♦ 8.8 Jeu de foire

Dans un jeu de foire, un chariot de masse m est lancé avec une vitesse $\vec{v}_0$ à partir d'un point A de la ligne de plus grande pente d'un plan incliné. L'inclinaison est α avec le plan horizontal.
Le solide parcourt une distance d sur le plan incliné avant de redescendre.

Données :
$m = 3$ kg ; $v_0 = 4{,}4 \text{ m.s}^{-1}$; $\alpha = 30°$; $d = 1{,}6$ m ; $g = 10 \text{ N.kg}^{-1}$.

On modélise le chariot par un solide en translation (*cf.* figure ci-dessous).



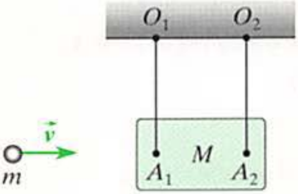
1° Pourquoi peut-on affirmer qu'il existe des forces de frottement ?

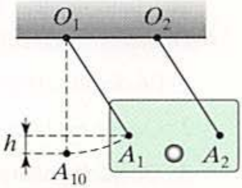
2° Soit $\vec{F}$ la résultante des forces de frottement ; elle est parallèle au déplacement et de sens contraire. On fait l'hypothèse que son intensité est constante. Calculer l'intensité de cette force.

3° On fait l'hypothèse qu'au cours de la descente, l'intensité de la force de frottement garde la même valeur.
Avec quelle vitesse le solide repassera-t-il à son point de départ ?

♦ 8.9 Pendule balistique

Un projectile, de masse $m = 36$ g et de vitesse horizontale $\vec{v}$ de valeur $v = 600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, vient frapper un sac plein de sable, de masse $M = 15{,}8$ kg, suspendu par deux tiges rigides identiques de masses négligeables.
Après le choc, le projectile s'incruste dans le sable et l'ensemble {bac, projectile} se met en mouvement à la vitesse v', mesurée par un dispositif à photocapteurs, qui donne $v' \approx 1{,}36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Cet ensemble s'élève alors jusqu'à une hauteur h déterminée par visée. La mesure donne $h \approx 9{,}2$ cm.





1° Calculer l'énergie mécanique du système {Terre - bac - projectile} juste avant l'impact.

2° Calculer l'énergie mécanique du système juste après le choc. Conclure.

3° Quelle est la nature du mouvement du pendule balistique après le choc ?

4° Que peut-on dire des travaux des forces exercées par les tiges sur le sac pendant son déplacement ? Conclure.

5° Évaluer h à partir des données et comparer avec la valeur mesurée.
Donnée : $g = 9{,}8 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

CORRIGÉS DES EXERCICES

8.1 **1°** *a*) Le système {Terre - air - marteau} est **isolé**, car **aucune force extérieure n'agit sur ce système**.

b) L'énergie totale $\mathscr{E}$ reste **constante**.

2° *a*) L'énergie microscopique U_{mic} reste **constante**, puisqu'il n'y a pas de frottements.

b) L'énergie mécanique $\mathscr{E}_{\text{M}} = \mathscr{E} - U_{\text{mic}}$ reste donc **constante**.

c) $\mathscr{E}_{\text{M}} = \mathscr{E}_{\text{K}} + \mathscr{E}_{\text{P}}$, d'où $\Delta\mathscr{E}_{\text{K}} + \Delta\mathscr{E}_{\text{P}} = 0$; donc $\Delta\mathscr{E}_{\text{K}} = -\Delta\mathscr{E}_{\text{P}}$.
La variation d'énergie cinétique est **égale à l'opposé de la variation d'énergie potentielle**.

3° Dans le référentiel terrestre :

$\Delta\mathscr{E}_{\text{K}} = \frac{1}{2} m \,.\, v_{\text{s}}^2 - 0 = \frac{1}{2} m \,.\, v_{\text{s}}^2$ (v_{s} = vitesse au sol) ;

$\Delta\mathscr{E}_{\text{P}} = 0 - m \,.\, \text{g} \,.\, h$ (origine de l'altitude au niveau du sol).

Donc $\Delta\mathscr{E}_{\text{K}} = -\Delta\mathscr{E}_{\text{P}}$, soit $\frac{1}{2} m \,.\, v_{\text{s}}^2 = -(-m \,.\, \text{g} \,.\, h)$, d'où $v_{\text{s}} = \sqrt{2\text{g} \,.\, h}$.

Application numérique : $v_{\text{s}} = \sqrt{2 \times 10 \times 8} = \mathbf{12{,}65\ m \,.\, s^{-1}}$.

Remarque : dans le référentiel terrestre, l'énergie cinétique de la Terre est nulle. On néglige la variation d'énergie cinétique de l'air mis en mouvement au cours du passage du marteau.

8.2 **1°** *a*) Ce système, englobant la Terre, la table et l'air, peut être considéré comme **isolé**.

b) L'énergie $\mathscr{E}$ de ce système est **constante**.

2° *a*) Le **coussin d'air** rend les frottements négligeables sur la table inclinée.

b) Dans ces conditions, l'énergie microscopique $U_{\text{mic}} = \text{C}^{\text{te}}$;
donc $\mathscr{E}_{\text{M}} = \text{C}^{\text{te}}$ et $\boldsymbol{\Delta\mathscr{E}_{\text{K}} = -\Delta\mathscr{E}_{\text{P}}}$.

3° *a*) Dans le référentiel terrestre :

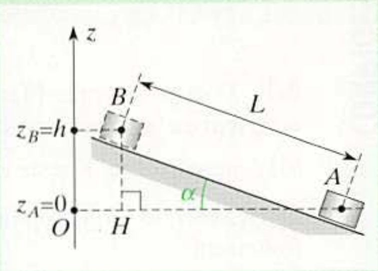
$\Delta\mathscr{E}_{\text{K}} = 0 - \frac{1}{2} m \,.\, v_0^2$;

$\Delta\mathscr{E}_{\text{P}} = m \,.\, \text{g} \,.\, h - 0$ (origine de l'axe des altitudes : point de lancement du palet) ;

$\Delta\mathscr{E}_{\text{K}} = -\Delta\mathscr{E}_{\text{P}}$, d'où $-\frac{1}{2} m \,.\, v_0^2 = -m \,.\, \text{g} \,.\, h$, donc $h = \frac{v_0^2}{2\text{g}}$.

Application numérique : $h = \frac{1{,}8^2}{2 \times 9{,}8} = 0{,}165$, soit $\boldsymbol{h = 0{,}165\ \text{m}}$.

b) Si A est le point de départ, B le point d'altitude maximale, nous avons (*cf.* figure) :



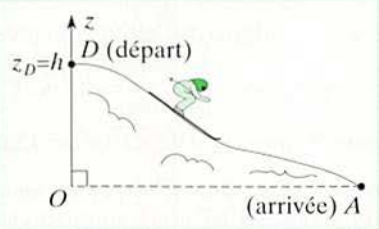
$$\sin\alpha = \frac{BH}{AB} = \frac{h}{L},$$

d'où $L = \dfrac{h}{\sin\alpha}$.

Application numérique : $L = \dfrac{0{,}165}{\sin 10°} = 0{,}95$, soit $\mathbf{L = 0{,}95\ m}$.

Le palet autoporteur parcourt donc **95 cm** avant de redescendre.

8.3 1° Le système {Terre - air - skieur} est isolé : l'énergie $\mathscr{E}$ de ce système reste **constante**.



2° *a*) Dans le référentiel terrestre :

$\Delta\mathscr{E}_K = \dfrac{1}{2}m \,.\, v_A^2 - 0 = \dfrac{1}{2}m \,.\, v_A^2$ (v_A = vitesse à l'arrivée),

d'où $\Delta\mathscr{E}_K = \dfrac{1}{2} \times 90 \times \left(\dfrac{108}{3{,}6}\right)^2 = 40\,500$, soit $\Delta\mathscr{E}_K = 40{,}5$ kJ .

$\Delta\mathscr{E}_P = 0 - m \,.\, g \,.\, h = -m \,.\, g \,.\, h$ (h = dénivelé),

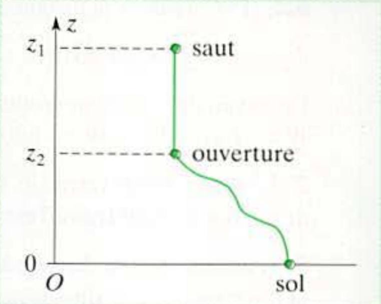
d'où $\Delta\mathscr{E}_P = -90 \times 10 \times 700 = -630\,000$, soit $\Delta\mathscr{E}_P = -630$ kJ .
On constate donc que $\boldsymbol{\Delta\mathscr{E}_K \neq -\Delta\mathscr{E}_P}$.

b) L'énergie mécanique ne se conserve pas.
Or $\mathscr{E} = \mathscr{E}_M + U_{mic}$; puisque $\mathscr{E} = C^{te}$, si $\mathscr{E}_M$ varie, U_{mic} varie : **l'énergie microscopique varie**, car il y a des frottements entre l'air et le skieur, entre les skis et le sol.

3° $\Delta\mathscr{E} = \Delta\mathscr{E}_M + \Delta U_{mic}$.
Or $\Delta\mathscr{E} = 0$ et $\Delta\mathscr{E}_M = \Delta\mathscr{E}_P + \Delta\mathscr{E}_K = -630 + 40{,}5 = -589{,}5$ kJ .
Donc $\Delta U_{mic} = -\Delta\mathscr{E}_M = 589{,}5$ kJ .
La variation d'énergie microscopique du système est de **589,5 kJ** . L'énergie microscopique a augmenté.

8.4 1° Le système est isolé : l'énergie du système reste **constante**.

2° Lorsqu'il atteint sa vitesse constante, l'énergie cinétique ne varie plus alors que son énergie potentielle diminue.
De même, lorsque son parachute est ouvert, l'énergie cinétique et l'énergie potentielle diminuent.
Donc l'énergie mécanique ne peut rester constante.



3° $\mathscr{E}=\mathscr{E}_{\mathrm{M}}+U_{\mathrm{mic}}$, d'où $\Delta\mathscr{E}=0=\Delta\mathscr{E}_{\mathrm{M}}+\Delta U_{\mathrm{mic}}$.
Si $\mathscr{E}_{\mathrm{M}}$ diminue, alors U_{mic} augmente.

4° *a*) Calculons $\Delta\mathscr{E}_{\mathrm{M}}$.

$$\Delta\mathscr{E}_{\mathrm{M}}=\left(\frac{1}{2}m\,.\,v_2^2+m\,.\,\mathrm{g}\,.\,z_2\right)-\left(\frac{1}{2}m\,.\,v_1^2+m\,.\,\mathrm{g}\,.\,z_1\right).$$

La vitesse initiale du parachutiste est nulle : l'hélicoptère est en vol stationnaire, v_2 est la vitesse au moment de l'ouverture du parachute.

$$\Delta\mathscr{E}_{\mathrm{M}}=93\times[400-2\,000]\times10+\frac{1}{2}\times93\times\left(\frac{180}{3{,}6}\right)^2,$$

d'où $\Delta\mathscr{E}_{\mathrm{M}}=-1{,}372\ \mathrm{MJ}$.
Donc $\boldsymbol{\Delta U_{\mathrm{mic}}=1{,}372\ \mathrm{MJ}}$.

b) $\Delta\mathscr{E}_{\mathrm{M}}=\frac{1}{2}m\,.\,v_s^2-m\,.\,\mathrm{g}\,.\,z_2-\frac{1}{2}m\,.\,v_2^2$; d'où :

$\Delta\mathscr{E}_{\mathrm{M}}=\frac{1}{2}\times93\times6^2-(93\times10\times400)=-486\,000\ \mathrm{J}$, soit $\Delta\mathscr{E}_{\mathrm{M}}=-486\ \mathrm{kJ}$;

donc $\boldsymbol{\Delta U_{\mathrm{mic}}=486\ \mathrm{kJ}}$.

8.5 1° Le travail du poids est positif lorsque l'ascenseur descend (force et déplacement ont le même sens) :
$W=P\,.\,h=m\,.\,\mathrm{g}\,.\,h$; d'où $W=1\,000\times10\times35=350\,000\ \mathrm{J}$,
soit $\boldsymbol{W=350\ \mathrm{kJ}}$.

2° Le travail du poids est maintenant négatif (force vers le bas et déplacement vers le haut) :
$W=-P\,.\,h=-m\,.\,\mathrm{g}\,.\,h$;
d'où $W=-1\,000\times10\times12=-120\,000\ \mathrm{J}$,
soit $\boldsymbol{W=-120\ \mathrm{kJ}}$.

8.6 1° Calculons la distance parcourue chaque seconde :

$$d = v \,.\, t = \frac{72}{3,6} \times 1 = 20 \text{ m}.$$

Le travail des forces de frottement est négatif :

$W = -F \,.\, l$; d'où $W = -800 \times 20 = -16\,000 \text{ J}$, soit $\mathbf{W = -16\ kJ}$.

2° Le poids, force verticale, est perpendiculaire au déplacement horizontal de la voiture : **son travail est donc nul.**

3° L'automobile se déplace à vitesse constante. On peut donc admettre que la force motrice est directement opposée à la force de frottement.
Cette force doit donc fournir un travail, chaque seconde, au moins égal à 16 kJ.
La puissance du moteur doit être de **16 kW**.

8.7 1° *a*) Une force extérieure agit sur le système entre A et B : le système n'est pas isolé.
Si W est le travail de la force $\vec{F}$, on a : $\Delta\mathscr{E} = W$.
Or $\Delta\mathscr{E} = \Delta\mathscr{E}_{\text{M}} + \Delta U_{\text{mic}}$ et $\Delta U_{\text{mic}} = 0$, car il n'y a pas de frottement.
D'où $\Delta\mathscr{E}_{\text{M}} = W$.
Avec $W = F \,.\, l = F \,.\, AB$, on a $W = 100 \times 1 = 100 \text{ J}$.
Donc $\mathbf{\Delta\mathscr{E}_{M} = 100\ J}$.

b) $\Delta\mathscr{E}_{\text{M}} = \Delta\mathscr{E}_{\text{K}} + \Delta\mathscr{E}_{\text{P}}$.
Or $\Delta\mathscr{E}_{\text{P}} = 0$, car, entre A et B, la piste est horizontale.

D'où $\Delta\mathscr{E}_{\text{K}} = \frac{1}{2}\text{m} \,.\, v_B^2 - 0 = \Delta\mathscr{E}_{\text{M}}$, donc $v_B = \sqrt{\dfrac{2 \,.\, \Delta\mathscr{E}_{\text{M}}}{m}}$.

Application numérique : $\mathbf{v_B = 6,32\ m \,.\, s^{-1}}$.

2° Entre B et C, la piste est horizontale : $\Delta\mathscr{E}_{\text{P}} = 0$; il n'y a pas de frottement : $\Delta U_{\text{mic}} = 0$.
Le système étant isolé :
$\Delta\mathscr{E} = 0 = \Delta\mathscr{E}_{\text{P}} + \Delta\mathscr{E}_{\text{K}} + \Delta U_{\text{mic}}$; donc $\Delta\mathscr{E}_{\text{K}} = 0$.
En C, la vitesse du solide est encore égale à $\mathbf{6,32\ m \,.\, s^{-1}}$.

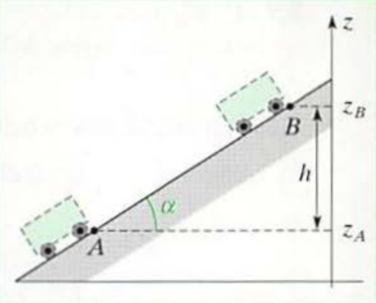
3° Appliquons la conservation de l'énergie entre C et D ; en D, la vitesse est nulle ; la dénivellation du solide est h ; $\Delta U_{\text{mic}} = 0$, car il n'y a pas de frottement.

$$\Delta\mathscr{E} = \Delta\mathscr{E}_{\text{M}} = \frac{1}{2}m \,.\, v_D^2 + m \,.\, \text{g} \,.\, h - \frac{1}{2}m \,.\, v_C^2 = 0,$$

soit $m \,.\, \text{g} \,.\, h = \frac{1}{2}m \,.\, v_C^2$, d'où $h = \dfrac{v_C^2}{2\text{g}}$.

Application numérique : $\mathbf{h = 2\ m}$.

8.8 1° Considérons le système {Terre - chariot} ; le plan incliné et l'air ne font pas partie du système. Calculons la variation de l'énergie mécanique entre le point A où le chariot est libéré et le point B d'altitude maximale, où le solide s'arrête avant de redescendre.



$$\Delta\mathscr{E}_{\rm M}=\left(\frac{1}{2}m\,.\,v_B^2+m\,.\,g\,.\,z_B\right)-\left(\frac{1}{2}m\,.\,v_A^2+m\,.\,g\,.\,z_A\right).$$

Or $v_B=0$, $v_A=v_0$ et $z_B-z_A=h=AB\,.\,\sin\alpha=d\,.\,\sin\alpha$.

Donc $\Delta\mathscr{E}_{\rm M}=m\,.\,g\,.\,d\,.\,\sin\alpha-\dfrac{1}{2}m\,.\,v_0^2$.

D'où $\Delta\mathscr{E}_{\rm M}=3\times10\times1{,}6\times\sin30°-\dfrac{1}{2}\times3\times4{,}4^2$, soit $\Delta\mathscr{E}_{\rm M}=-5{,}04\ \text{J}$.

Ainsi, $\Delta\mathscr{E}_{\rm M}<0$; l'énergie mécanique du système considéré ne reste pas constante. Il y a des forces extérieures à ce système qui fournissent un travail résistant. **Ces forces sont la réaction du plan incliné et l'action de l'air**. Leur résultante a une composante tangentielle non nulle : c'est la force de frottement dont le travail est résistant.

2° $\Delta\mathscr{E}_{\rm M}=W=-F\,.\,d$, d'où $F=\dfrac{5{,}04}{1{,}6}=\mathbf{3{,}15\ N}$.

3° Pour la descente, entre les passages en B et A, on aura :

$$\Delta\mathscr{E}_{\rm M}=W(\vec{F})\ \text{ et }\ \Delta\mathscr{E}_{\rm K}+\Delta\mathscr{E}_{\rm P}=W(\vec{F}).$$

Or $\Delta\mathscr{E}_{\rm K}=\dfrac{1}{2}m\,.\,v_A^2-\dfrac{1}{2}m\,.\,v_B^2=\dfrac{1}{2}m\,.\,v_A^2$ ($v_B=0$ au sommet de la trajectoire).

$\Delta\mathscr{E}_{\rm P}=-m\,.\,g\,.\,h=-m\,.\,g\,.\,d\,.\,\sin\alpha$, d'où $\Delta\mathscr{E}_{\rm P}=-24{,}0\ \text{J}$.

$W(\vec{F})=-5{,}04\ \text{J}$; à la descente, la force de frottement a changé de sens mais son intensité reste la même. Son travail est donc le même.

$\dfrac{1}{2}m\,.\,v_A^2=-\Delta\mathscr{E}_{\rm P}+W(\vec{F})$, $\dfrac{1}{2}m\,.\,v_A^2=24{,}0-5{,}04=18{,}96$,

d'où $v_A^2=\dfrac{18{,}96\times2}{3}$, soit $v_A=\mathbf{3{,}55\ m\,.\,s^{-1}}$.

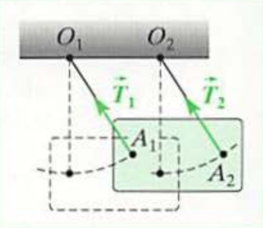
Remarque : on peut écrire également entre les deux passages en A :

$\Delta\mathscr{E}_{\rm M}=2\,W(\vec{F})$, avec $W(\vec{F})$ le travail de la force de frottement sur un demi-trajet.

$\dfrac{1}{2}m\,.\,v_A^2-\dfrac{1}{2}m\,.\,v_0^2=2\,W(\vec{F})$, donc $\dfrac{1}{2}m\,.\,v_A^2=\dfrac{1}{2}m\,.\,v_0^2-2\,W(\vec{F})$.

8.9 1° $\mathscr{E}_{M_1} = \mathscr{E}_K + \mathscr{E}_P$.
En prenant pour origine de l'énergie potentielle, la position initiale du sac de sable : $\mathscr{E}_P = 0$.

L'énergie cinétique de la balle est : $\frac{1}{2} m \,.\, v^2$.
L'énergie cinétique du sac de sable est nulle.



Donc $\mathscr{E}_{M_1} = \frac{1}{2} m \,.\, v^2$,

d'où $\mathscr{E}_{M_1} = \frac{1}{2} \times 36 \,.\, 10^{-3} \times 600^2 = \mathbf{6\,480\ J}$.

2° $\mathscr{E}_{M_2} = \frac{1}{2}(M+m)\, v'^2 = \mathbf{14{,}6\ J}$;

l'énergie mécanique diminue (frottement au moment de l'impact).

3° Le pendule balistique est animé d'un **mouvement de translation circulaire**.

4° Les forces $\vec{T}_1$ et $\vec{T}_2$ exercées par les tiges rigides sont perpendiculaires au déplacement de leurs points d'application A_1 et A_2 ; **le travail de ces forces est nul**.
L'énergie mécanique du système se conserve.

5° Appliquons la conservation de l'énergie mécanique :

$$\mathscr{E}_M(\text{initiale}) = \mathscr{E}_M(\text{finale}),$$

$$\frac{1}{2}(M+m)\, v'^2 = \frac{1}{2}(M+m)\, v_f^2 + (M+m) \,.\, g \,.\, h.$$

Or $v_f = 0$, donc $\frac{1}{2}(M+m)\, v'^2 = (M+m) \,.\, g \,.\, h$, d'où $h = \frac{v'^2}{2g}$.

Application numérique : $\mathbf{h \approx 9{,}4\ cm}$.

Cette valeur est légèrement supérieure à la valeur mesurée : on a négligé les frottements de l'air et des axes de rotation.

9

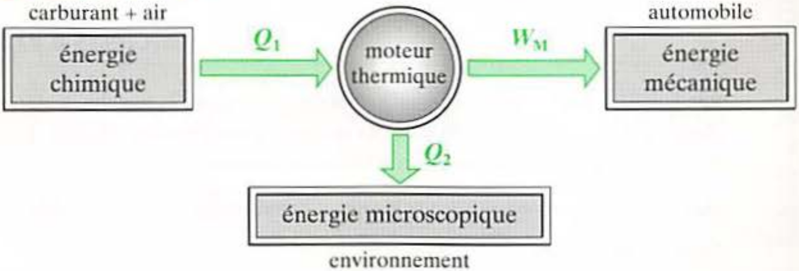
LES MACHINES THERMIQUES

RÉSUMÉ DU COURS

Moteurs thermiques

Un moteur thermique est un convertisseur d'énergie qui transforme une partie de la chaleur qu'il reçoit Q_1 en travail mécanique W_M.
Le reste de l'énergie est transféré sous forme de chaleur perdue dans le milieu extérieur.

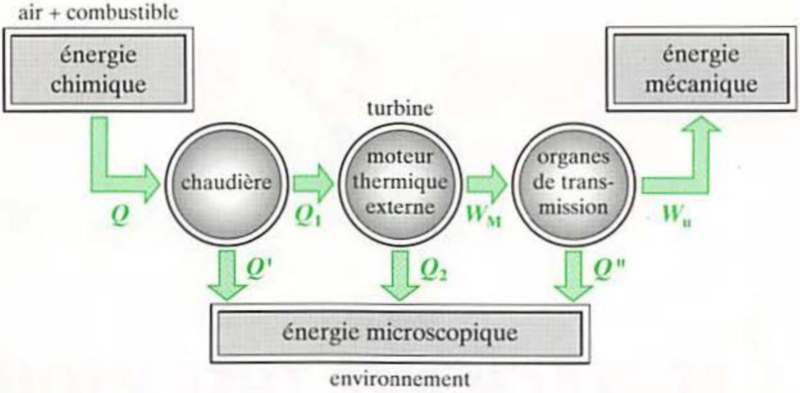
■ Bilan énergétique


carburant + air
énergie chimique
Q_1
moteur thermique
W_M
automobile
énergie mécanique
Q_2
énergie microscopique
environnement

Moteurs thermiques à combustion externe

La machine à vapeur, la turbine à vapeur sont des moteurs thermiques à **combustion externe** : la source de chaleur est à l'extérieur du moteur. La chaudière est la source chaude, le condenseur est la source froide.

Bilan énergétique


air + combustible
énergie chimique
Q
chaudière
Q₁
turbine
moteur thermique externe
W_M
organes de transmission
W_u
énergie mécanique
Q'
Q₂
Q"
énergie microscopique
environnement

Rendements

- $\eta_c = \dfrac{Q_1}{Q}$ est le rendement de la chaudière.
- $\eta_0 = \dfrac{W_M}{Q_1}$ est le rendement thermique du moteur.
- $\eta_M = \dfrac{W_u}{W_M}$ est le rendement mécanique.
- $\eta_g = \dfrac{W_u}{Q}$ est le rendement industriel, ou rendement global.

$$\boxed{\eta_g = \eta_c \cdot \eta_0 \cdot \eta_M}$$

Remarque : toutes les quantités qui figurent dans ces expressions sont comptées arithmétiquement ; elles sont toutes positives.

Moteurs à explosion

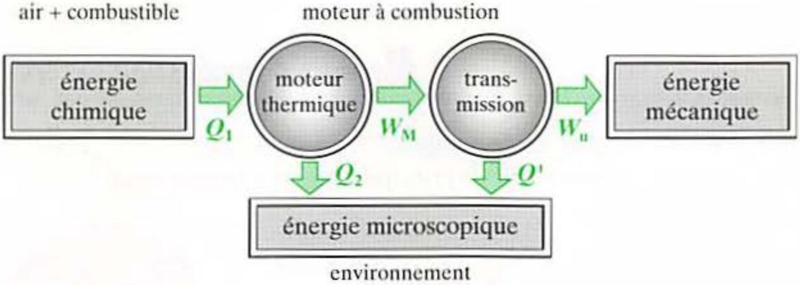
Les moteurs à allumage commandé (moteurs à essence) et moteurs à allumage par compression (moteurs diesel) sont des moteurs à **combustion interne** : la combustion du mélange air-combustible s'effectue à l'intérieur du moteur.

Dans le moteur à essence à quatre temps, les quatre temps du moteur sont :

- l'admission,
- la compression,
- l'explosion et la détente,
- l'échappement.

Le troisième temps (explosion et détente) produit du travail mécanique (temps moteur).

Bilan énergétique


air + combustible
moteur à combustion
énergie chimique
Q_1
moteur thermique
W_M
trans-mission
W_u
énergie mécanique
Q_2
Q'
énergie microscopique
environnement

Rendements

- $\eta_0 = \dfrac{W_M}{Q_1}$ est le rendement thermique.
- $\eta_M = \dfrac{W_u}{W_M}$ est le rendement mécanique.
- $\eta_g = \dfrac{W_u}{Q_1}$ est le rendement industriel.

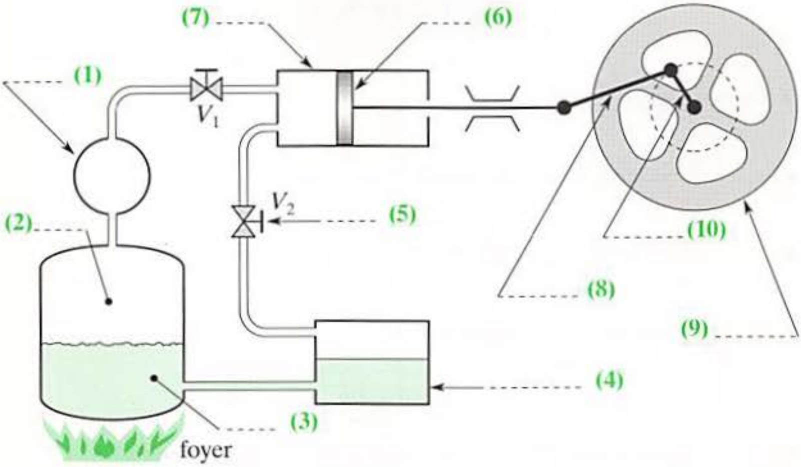
$$\boxed{\eta_g = \eta_M \cdot \eta_0}$$

Remarque : dans ces expressions, les quantités sont comptées arithmétiquement.

Moteurs à combustion externe

9.1 Principe de la machine à vapeur

La figure ci-dessous est celle du principe d'une machine à vapeur.



1° Compléter les légendes avec les mots suivants :

vanne ; cylindre ; volant d'inertie ; bielle ; manivelle ; condenseur ; vapeur ; eau liquide ; surchauffeur ; piston.

2° Quel est le rôle du système {bielle - manivelle} ?

3° Montrer que le fonctionnement de la machine est cyclique.

♦ 9.2 La turbine à vapeur

Le groupe de turbines à vapeur d'une centrale thermique a une puissance mécanique disponible sur l'arbre $\mathcal{P}_u = 900$ MW.

Pour refroidir le condenseur, des pompes prélèvent chaque seconde, dans une rivière, 20 m^3 d'eau à 14 °C.

Le rendement thermique du groupe de turbines est $\eta_0 = 0{,}4$.

Le rendement mécanique des organes de transmission est $\eta_M = 0{,}9$.

On néglige l'énergie cinétique de la vapeur à la sortie.

Donnée : $c_{\text{eau}} = 4{,}18\ \text{kJ}\,.\,\text{kg}^{-1}\,.\,{}^\circ\text{C}^{-1}$.

1° Effectuer le bilan énergétique de la centrale thermique.

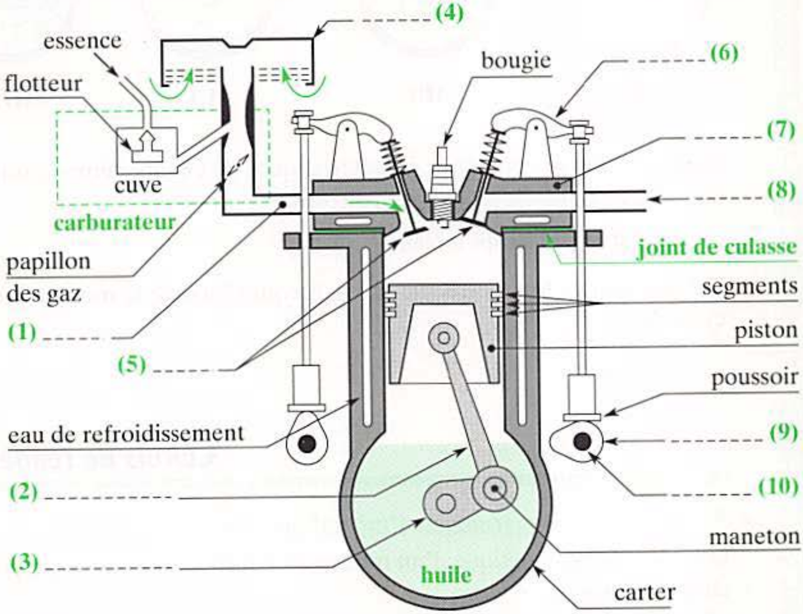
2° Calculer la quantité de chaleur cédée, chaque seconde, au condenseur par la vapeur.

3° Déterminer l'élévation de température de l'eau qui sert au refroidissement du condenseur.

Moteurs à combustion interne

9.3 Principe d'un moteur à essence

La figure ci-dessous est celle d'un moteur à essence à quatre temps.


(4)
essence
bougie
(6)
flotteur
(7)
cuve
(8)
carburateur
joint de culasse
papillon des gaz
segments
(1)
piston
(5)
poussoir
eau de refroidissement
(9)
(2)
(10)
maneton
(3)
huile
carter

1° Compléter les légendes à l'aide des mots suivants :

filtre à air ; tubulure d'admission ; tubulure d'échappement ; soupapes ; came ; arbre à cames ; bielle ; culasse ; culbuteur ; manivelle.

2° Quel est le rôle du système {bielle - vilebrequin} ?

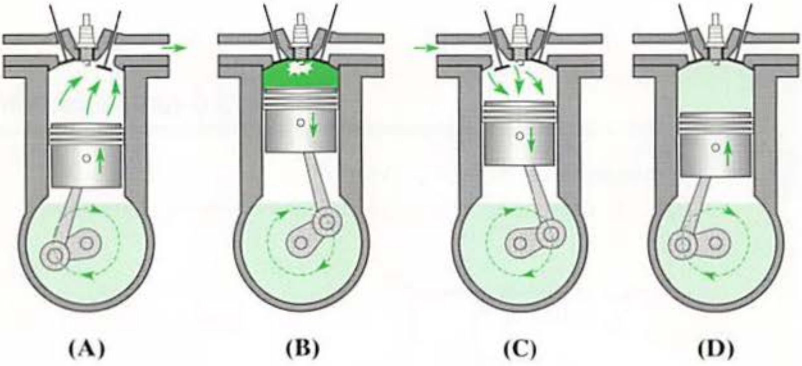
3° *a*) Quel est le rôle de la bougie ?

b) Comment est déclenchée la combustion du mélange air-gazole dans un moteur diesel ?

9.4 Les quatre temps du moteur à explosion

1° Nommer les quatre temps d'un moteur à explosion.

2° *a*) Sur la figure ci-dessous, on a représenté les quatre temps du moteur à essence, mais dans le désordre. Attribuer à chaque schéma le temps correspondant.



b) Décrire les phénomènes caractéristiques de chaque temps : soupapes ouvertes ou fermées, mouvement du piston…

c) Quel est le seul temps moteur ?

3° Combien de tours effectue le vilebrequin lorsque le moteur décrit un cycle ?

Calculs de rendement

♦ 9.5 Rendement mécanique d'un moteur à explosion

Dans le bilan énergétique d'un moteur à explosion, une revue propose les chiffres suivants :

« Pour 100 J d'énergie fournie par la combustion du carburant, l'énergie transmise aux roues est W_u ; 8 J sont perdus dans les organes de transmission ; 20 J sont évacués à l'extérieur par le système de refroidissement ; 42 J sont évacués par les gaz d'échappement. »

1° *a*) Représenter le bilan d'énergie de ce moteur sous forme de schéma-bloc faisant intervenir les réservoirs d'énergie et les transferts d'énergie.

b) Calculer W_u.

2° Calculer le rendement thermique η_0 et le rendement industriel η_g.

9.6 Le moteur d'une « Suzuki »

Le moteur à essence d'une « Suzuki 600 R » reçoit une puissance de 72 kW résultant de la combustion du carburant. Sa puissance sur l'essieu de la roue est de 22 kW.
Le rendement mécanique de la transmission arbre-essieu est de 0,90.

1° Déterminer le rendement thermique de ce moteur.

2° Calculer la puissance thermique cédée à l'environnement au niveau du moteur.

♦ 9.7 Rendement du moteur d'une automobile

Le moteur d'une « Twingo » consomme 7,7 L d'essence aux 100 km à la vitesse stabilisée de 120 km . h^{-1} ; il fournit alors une puissance de 23 ch sur l'arbre moteur. La masse volumique de l'essence est de 0,72 kg . L^{-1}. La combustion de l'essence fournit une quantité de chaleur égale à 45 MJ . kg^{-1}.
Calculer le rendement industriel du moteur dans ces conditions.

Donnée : 1 ch = 736 W.

♦ 9.8 Consommation et rendement du moteur d'une automobile

Le moteur d'une « 605 SV 24 » a une cylindrée de 2 975 cm^3 pour quatre cylindres. Le mélange gazeux d'essence et d'air qui pénètre dans chaque cylindre pendant le temps d'admission est tel que 12 L de ce mélange contiennent 0,5 g d'essence.

1° Quel est le volume du mélange gazeux qui pénètre dans l'ensemble des cylindres pendant une minute, si l'arbre moteur tourne à la vitesse de 3 000 tr . min^{-1} ?

2° Quelle est la masse d'essence consommée pendant une heure ?

3° Quelle est l'énergie fournie par la combustion d'essence en une heure ? 1 kg d'essence libère 45 MJ.

4° Le rendement industriel de ce moteur est de 28 %. Calculer la puissance disponible sur l'arbre de sortie.

Aide : le vilebrequin fait deux tours lorsqu'un piston décrit un cycle.
La cylindrée est le volume utile du moteur ; elle équivaut au volume de mélange combustible introduit lors d'une admission dans chacun des cylindres.

♦♦ 9.9 Rendement d'une turbine à vapeur

Dans une turbine à vapeur, la vapeur entre avec une vitesse négligeable et sous une pression de 14 bars à 300 °C.
À la sortie de la turbine, la vapeur est évacuée à la vitesse de 100 m . s^{-1} sous une pression de 2 bars et à une température de 130 °C.

Les différentes pertes, par frottement mécanique, frottement des roues dans la vapeur, entraînement des auxiliaires, donnent un rendement mécanique η_M de 95 %.

On peut admettre que la quantité de chaleur Q_1 apportée par 1 kg de vapeur à l'entrée est de 360 kJ ; le travail utile W_u disponible sur l'arbre moteur est de 285 kJ par kg de vapeur.

1° Faire un schéma du bilan énergétique de la turbine faisant apparaître les transferts d'énergie.

2° Calculer l'énergie cinétique de 1 kg de vapeur à la sortie de la turbine.

3° Calculer :

a) le travail mécanique W_M fourni par 1 kg de vapeur ;

b) la quantité de chaleur Q_2 transférée à l'environnement par 1 kg de vapeur.

4° Cette turbine utilise 10 t de vapeur par heure. Calculer la puissance $\mathcal{P}_u$ disponible sur l'arbre moteur.

5° La puissance $\mathcal{P}_u$ est liée au moment du couple $\mathcal{M}$ et à la vitesse de rotation ω par : $\mathcal{P}_u = \mathcal{M} . \omega$.
Calculer $\mathcal{M}$ pour une vitesse de 3 000 tr . min^{-1}.

Réfrigérateur - Pompe à chaleur

Réfrigérateur et pompe à chaleur sont des machines thermiques.
Un moteur fournissant le travail mécanique W_M *permet de prélever la quantité de chaleur* Q_2 *à une source froide et de céder la quantité de chaleur* $Q_1 = Q_2 + W_M$ *à une source chaude.*

(N.B. : toutes les quantités sont comptées arithmétiquement.)

♦ **9.10** Le compresseur d'un réfrigérateur fournit au fluide caloporteur une puissance mécanique $\mathcal{P}_M = 240$ W.

Le coefficient de performance c.p. $= \dfrac{Q_2}{W_M}$ vaut 4, dans les conditions normales de fonctionnement.

1° Quelles sont les sources chaude et froide pour le réfrigérateur ?

2° Quel est le bilan énergétique d'un réfrigérateur ?

3° Quelle est, lorsque le compresseur fonctionne, la puissance thermique $\mathcal{P}_2$ (quantité de chaleur prise à la source froide et retirée par seconde au compartiment du réfrigérateur) ?

♦ **9.11** Une pompe à chaleur sert à réchauffer l'air d'un appartement. Elle est refroidie par l'air extérieur à la maison ou l'eau d'une rivière, par exemple. Une pompe à chaleur est équipée d'un compresseur de puissance $\mathcal{P}_M = 3$ kW. Son coefficient de performance $\text{c.p.} = \dfrac{Q_1}{W_M}$ est voisin de 3 ; Q_1 désigne la quantité de chaleur cédée à l'appartement.

1° Quelles sont les sources chaude et froide pour la pompe à chaleur ?

2° Quel est le bilan énergétique d'une pompe à chaleur ?

3° Écrire l'expression littérale définissant le coefficient de performance.

4° Quelle est, lorsque le compresseur fonctionne, la puissance thermique apportée au bâtiment chauffé ?

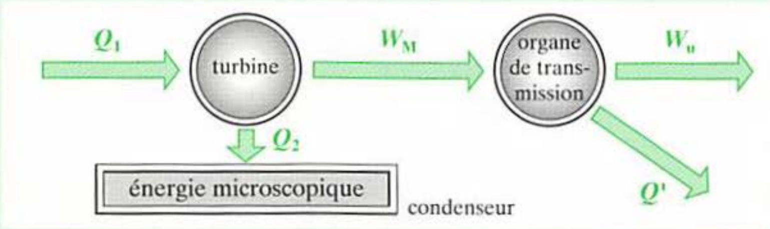
DES EXERCICES

9.1 **1° Légende du schéma** :
(1) surchauffeur ; **(2)** vapeur ; **(3)** eau liquide ; **(4)** condenseur ; **(5)** van
(6) piston ; **(7)** cylindre ; **(8)** bielle ; **(9)** volant d'inertie ; **(10)** manivelle.

2° Le système {bielle - manivelle} **transforme le mouvement de trans tion du piston en mouvement de rotation communiqué aux roues.**

3° La vanne V_2 étant fermée, V_1 est ouverte ; la vapeur surchauffée s haute pression repousse le piston. En bout de course, V_1 se ferme et s'ouvre. Sous l'action du mouvement d'entraînement de la roue, le pist chasse la vapeur sous faible pression dans le condenseur en se déplaçant la droite vers la gauche. En fin de course, V_2 se ferme et V_1 s'ouvre à n veau. **Le cycle est bouclé ; un autre recommence.**

9.2 1° Considérons la chaîne énergétique du moteur externe et écriv les divers rendements.



$$\eta_M = \frac{W_u}{W_M}\,;\ \eta_0 = \frac{W_M}{Q_1}.$$

2° La conservation de l'énergie impose $Q_1 = Q_2 + W_M$,

d'où $Q_2 = Q_1 - W_M = W_M\left(\frac{1}{\eta_0} - 1\right) = \frac{W_u}{\eta_M}\left(\frac{1}{\eta_0} - 1\right)$.

Application numérique : comme $W_u = \mathcal{P}_u \,.\, \Delta t$,
on a $W_u = 900 \,.\, 10^6 \times 1 = 900 \,.\, 10^6$ J, soit $\mathbf{W_u = 900}$ **MJ**.

$$Q_2 = \frac{900 \,.\, 10^6}{0{,}9}\left(\frac{1}{0{,}4} - 1\right) = 1\,500 \,.\, 10^6, \text{ soit } \mathbf{Q_2 = 1\,500\ MJ}.$$

3° La chaleur Q_2 apportée au condenseur est transférée chaque second l'eau de refroidissement du condenseur. Lorsque la température de ce eau augmente de $\Delta\theta$, elle reçoit la quantité de chaleur : $Q_2 = m \,.\, c \,.\, \Delta\theta$.
Or $m = \rho \,.\, D$, ρ étant la masse volumique de l'eau et D le débit volumiq

$Q_2 = \rho \,.\, D \,.\, c \,.\, \Delta\theta$, d'où $\Delta\theta = \dfrac{Q_2}{\rho \,.\, D \,.\, c}$.

Donc $\Delta\theta = \dfrac{1\,500 \,.\, 10^6}{10^3 \times 20 \times 4{,}18 \,.\, 10^3} \approx$ **18 °C**.

9.3 **1° Légende de la figure :**

(**1**) tubulure d'admission ; (**2**) bielle ; (**3**) manivelle ; (**4**) filtre à air ; (**5**) soupapes ; (**6**) culbuteur ; (**7**) culasse ; (**8**) tubulure d'échappement ; (**9**) came ; (**10**) arbre à cames.

2° Le système {bielle - vilebrequin} **transforme le mouvement rectiligne alternatif de translation du piston en mouvement de rotation de l'arbre**.

3° *a*) Au cours du 3^e temps, **l'étincelle qui apparaît entre les bornes de la bougie provoque l'explosion du mélange air-essence**. Les gaz brûlés sont alors portés à haute température et à haute pression.

b) Dans un moteur diesel, il n'y a pas de bougies ; **le mélange explose spontanément quand il est fortement comprimé**.

9.4 **1°** 1er temps : **admission**.

2^e temps : **compression**.

3^e temps : **explosion et détente**.

4^e temps : **échappement**.

2° *a*) (A) : **échappement**, (B) : **explosion et détente**, (C) : **admission**, (D) : **compression**.

b) **1er temps** : la soupape d'admission s'ouvre ; le piston, entraîné par le système {bielle - manivelle}, descend et aspire le mélange air-essence venant du carburateur.

2^e temps : les soupapes d'admission et d'échappement sont fermées ; le piston, en remontant, comprime le mélange gazeux jusqu'à 7 ou 8 bars.

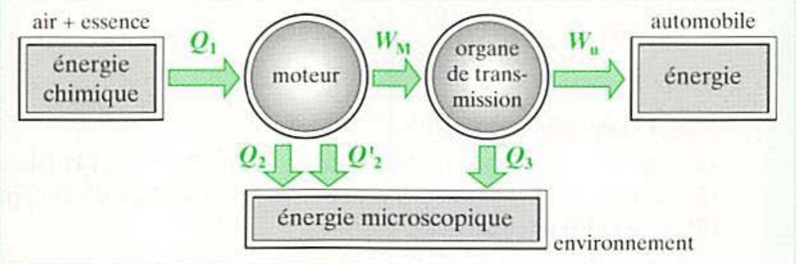
3^e temps : les soupapes sont encore fermées. Une étincelle jaillissant de la bougie provoque la combustion explosive du mélange. La pression des gaz augmente brutalement (25 bars), le piston est repoussé.

4^e temps : le piston remonte et la soupape d'échappement s'ouvre : les gaz brûlés sont alors éjectés.

c) Le temps moteur est le **3^e temps**.

3° Le vilebrequin fait **deux tours par cycle**. Avec un moteur à quatre cylindres, il y a toujours un des quatre cylindres qui se trouve au temps moteur et qui entraîne le mouvement régulier des pistons des trois autres cylindres.

9.5 1° *a*) Les réservoirs d'énergie sont représentés par des rectangles, les convertisseurs d'énergie par des cercles.



b) $Q_1 = 100\,\text{J}$; $Q_2 = 20\,\text{J}$ (système de refroidissement).
$Q'_2 = 42\,\text{J}$ (évacués par les gaz d'échappement).
$Q_3 = 8\,\text{J}$.
Le principe de conservation de l'énergie implique :
$Q_1 = W_u + Q_3 + Q'_2 + Q_2$, d'où $\mathbf{W_u = 30\,J}$.

2° Le rendement thermique est défini par $\eta_0 = \dfrac{W_M}{Q_1}$; or, d'après le principe de conservation de l'énergie : $W_u + Q_3 = W_M$.

$\eta_0 = \dfrac{(W_u + Q_3)}{Q_1} = \dfrac{38}{100}$, soit $\boldsymbol{\eta_0 = 38\ \%}$.

Le rendement industriel ou global est défini par : $\eta_g = \dfrac{W_u}{Q_1} = 0{,}30$,
soit $\boldsymbol{\eta_g = 30\ \%}$.

9.6 1° Le rendement mécanique de la transmission est égal à $\eta_M = \dfrac{\mathcal{P}_u}{\mathcal{P}_M}$.
$\mathcal{P}_u$ est la puissance transmise à la roue, $\mathcal{P}_M$ la puissance fournie aux pistons.

Le rendement thermique du moteur est : $\eta_0 = \dfrac{\mathcal{P}_M}{\mathcal{P}_C}$,
où $\mathcal{P}_C$ est la puissance fournie par la combustion du mélange air-carburant.

Comme $\mathcal{P}_M = \dfrac{\mathcal{P}_u}{\eta_M}$, on a $\eta_0 = \dfrac{\mathcal{P}_u}{\eta_M \cdot \mathcal{P}_C}$, d'où $\eta_0 = \dfrac{22}{0{,}9 \times 72} = 0{,}34$,
soit $\boldsymbol{\eta_0 = 34\ \%}$.

2° La conservation de l'énergie impose : $\mathcal{P}_C = \mathcal{P}_{Th} + \mathcal{P}_M = \mathcal{P}_{Th} + \dfrac{\mathcal{P}_u}{\eta_M}$,
où $\mathcal{P}_{Th}$ est la puissance thermique cédée à l'environnement.

D'où $\mathcal{P}_{Th} = 72 - \dfrac{22}{0{,}9} = 47{,}56\,\text{kW}$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{Th} = 47{,}6\ kW}$.

9.7 Pour calculer le rendement industriel $\eta = \frac{\mathcal{P}_u}{\mathcal{P}_C}$, il faut calculer la puissance $\mathcal{P}_C$ fournie par la combustion, c'est-à-dire la chaleur fournie chaque seconde par la combustion de l'essence.

Pour parcourir $100\ \text{km}$, l'automobile met $\frac{100}{120} \times 3\,600 = 3\,000\ \text{s}$.

Chaque seconde, elle consomme $\frac{7{,}7}{3\,000}\ \text{L}$, soit une masse :

$$m = \frac{7{,}7}{3\,000} \times 0{,}72 = 1{,}85 \,.\, 10^{-3}\ \text{kg}.$$

La combustion de cette masse d'essence libère chaque seconde une quantité de chaleur :

$$\mathcal{P}_C = 1{,}85 \,.\, 10^{-3} \times 45 \,.\, 10^6 = 83\,250\ \text{J}.$$

Donc, la puissance $\mathcal{P}_C$ est égale à $83\,250\ \text{W}$.

$\mathcal{P}_u = 23 \times 736 = 16\,928\ \text{W}$.

D'où $\eta = \frac{16\,928}{83\,250} = 0{,}20$, soit $\boldsymbol{\eta = 20\ \%}$.

9.8 1° L'arbre moteur tourne à la vitesse de $3000\ \text{tr} \,.\, \text{min}^{-1}$. Or, deux tours de vilebrequin correspondent à une admission pour chaque cylindre, soit un volume gazeux admis égal à la cylindrée du moteur. Chaque minute, il pénètre dans l'ensemble des cylindres $V = 2{,}975 \times 1\,500 = \mathbf{4\,462{,}5\ L}$ de mélange.

2° La consommation d'essence par heure est donc :

$$M = \frac{4\,462{,}5 \times 0{,}5}{12} \times 60 = 11\,156\ \text{g},$$

soit $M \approx \mathbf{11{,}16\ kg}$.

3° La chaleur fournie par la combustion de M kg d'essence est donc :

$$Q_1 = 11{,}16 \times 45 \,.\, 10^6 = 502{,}2 \,.\, 10^6\ \text{J},$$

soit $\boldsymbol{Q_1 \approx 502\ \text{MJ}}$.

4° La puissance thermique produite dans le moteur est :

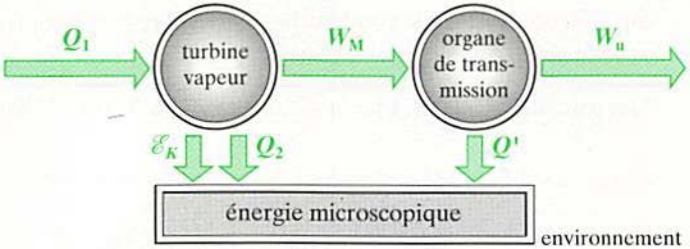
$$\mathcal{P}_{Th} = \frac{502\,000}{3\,600} = 139\,500\ \text{W},$$

soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{Th} = 139{,}5\ \text{kW}}$.

Or $\eta = \frac{\mathcal{P}_u}{\mathcal{P}_{Th}}$, donc $\mathcal{P}_u = \eta \,.\, \mathcal{P}_{Th}$,

d'où $\boldsymbol{\mathcal{P}_u = 39{,}1\ \text{kW}}$.

9.9 1°


Q_1
turbine vapeur
W_M
organe de transmission
W_u
$\mathscr{E}_K$
Q_2
Q'
énergie microscopique
environnement

2° $\mathscr{E}_K = \frac{1}{2} m \,.\, v^2$, d'où $\mathscr{E}_K = \frac{1}{2} \times 1 \times (100)^2 = 5\,000$,
soit $\boldsymbol{\mathscr{E}_K = 5}$ **kJ**.

3° *a*) Le rendement mécanique est tel que $\eta_M = \frac{W_u}{W_M}$.

Donc $W_M = \frac{285}{0{,}95} = 300$ kJ.

Le principe de conservation de l'énergie appliquée à la turbine et au gaz qui la traverse s'écrit :

$$\boldsymbol{Q_1 = W_M + \mathscr{E}_K + Q_2}.$$

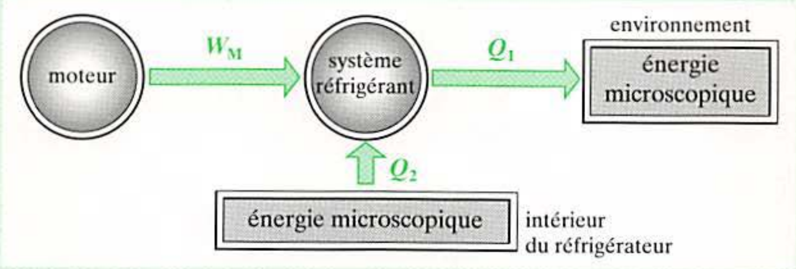
b) $\boldsymbol{Q_2}$ est la quantité de chaleur cédée à l'environnement par la vapeur :
$Q_2 = 360 - 5 - 300 = 55$.
Donc $\boldsymbol{Q_2 = 55}$ **kJ**.

4° $\mathscr{P}_u = 285 \times \frac{10^4}{3\,600} = 792 \,.\, 10^3$,
soit $\boldsymbol{\mathscr{P}_u = 792}$ **kW**.

5° $\omega = 3\,000 \times \frac{2\pi}{60} = 314{,}16 \text{ rad} \,.\, \text{s}^{-1}$.
D'où $\mathcal{M} = \frac{792 \,.\, 10^3}{314{,}16} \approx 2{,}5 \,.\, 10^3$,
soit $\boldsymbol{\mathcal{M} \approx 2{,}5 \,.\, 10^3}$ **N . m**.

9.10 1° La source chaude est **l'air ambiant de la pièce** dans laquelle se trouve le réfrigérateur.
La source froide est l'**ensemble des objets situés à l'intérieur du réfrigérateur**.

2° $W_M + Q_2 = Q_1$.

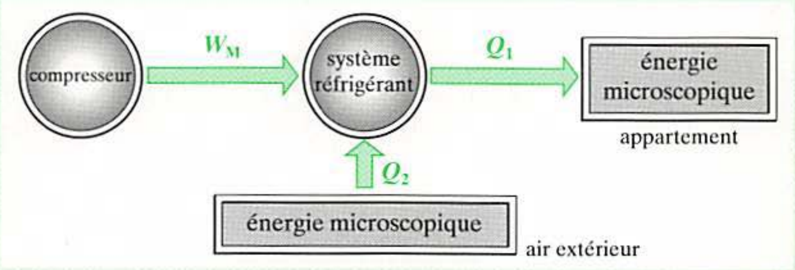

moteur
W_M
système réfrigérant
Q_1
environnement
énergie microscopique
Q_2
énergie microscopique
intérieur du réfrigérateur

3° $Q_2 = \text{c.p.}\,.\,W_M$.

Donc $\mathcal{P}_2 = \text{c.p.}\,.\,\mathcal{P}_M$, d'où $\mathcal{P}_2 = 4 \times 240 = 960$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_2 = 960\ \mathrm{W}}$.

9.11 1° Pour la pompe à chaleur, la source froide est l'**extérieur** ou l'eau de la rivière ; la source chaude est l'air à l'**intérieur** de la maison ou de l'appartement.

2° $\boldsymbol{Q_1 = \mathrm{W}_M + Q_2}$.


compresseur
W_M
système réfrigérant
Q_1
énergie microscopique
appartement
Q_2
énergie microscopique
air extérieur

3° $\text{c.p.} = \dfrac{\textbf{quantité de chaleur cédée à la source chaude}}{\textbf{travail mécanique fourni par le compresseur}}$.

4° $\mathcal{P}_1 = \text{c.p.}\,.\,\mathcal{P}_M$, d'où $\mathcal{P}_1 = 3 \times 3 = 9$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_1 = 9\ \mathrm{kW}}$.

10

BILAN ÉNERGÉTIQUE D'UN RÉCEPTEUR ÉLECTRIQUE

RÉSUMÉ DU COURS

- La puissance électrique $\mathcal{P}_E$ reçue par un récepteur, alimenté sous une tension continue de valeur U et parcouru par un courant d'intensité I, est :

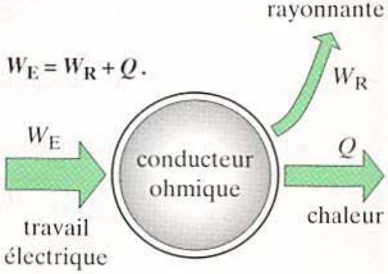
$$\boxed{\mathcal{P}_E = U . I}$$

Unités : $\mathcal{P}_E$ en watt (W), U en volt (V) et l'intensité I en ampère (A).

- L'effet Joule est la conversion en chaleur et en énergie rayonnante du travail électrique reçu par un conducteur ohmique. La puissance dissipée par effet Joule est :

$$\boxed{\mathcal{P}_J = R . I^2 = \frac{U^2}{R}}$$

Unités : $\mathcal{P}_J$ en watt (W), la résistance R en ohm (Ω) et l'intensité I en ampère (A).



$W_E = W_R + Q.$

énergie
rayonnante
W_R
W_E
conducteur ohmique
Q
travail électrique
chaleur

L'électrolyseur

- Un électrolyseur convertit une partie du travail électrique reçue $W_E = U \, . \, I \, . \, \Delta t$ en énergie chimique :

$$\boxed{\Delta \mathscr{E}_{Ch} = E \, . \, I \, . \, \Delta t}$$

- La **force électromotrice** de l'électrolyseur est la grandeur :

$$\boxed{E = \frac{\mathscr{P}_{Ch}}{I}}$$

avec $\mathscr{P}_{Ch} = E \, . \, I$.

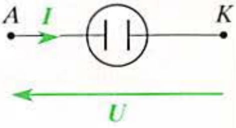
- L'énergie dissipée par effet Joule, sous forme de chaleur, est :

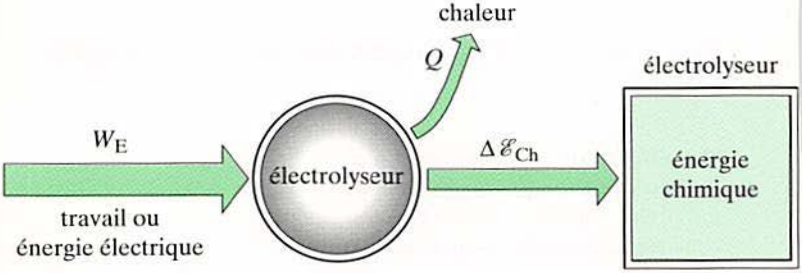
$$\boxed{Q = r \, . \, I^2 \, . \, \Delta t}$$

r étant la **résistance interne** de l'électrolyseur.

- La loi de fonctionnement d'un électrolyseur est :

$$\boxed{U = E + r \, . \, I}$$




chaleur
Q
électrolyseur
W_E
électrolyseur
$\Delta \mathscr{E}_{Ch}$
énergie chimique
travail ou énergie électrique

W_E, $\Delta \mathscr{E}_{Ch}$ et Q sont des quantités arithmétiques.

- Le rendement de l'électrolyseur est :

$$\boxed{\eta = \frac{\Delta \mathscr{E}_{Ch}}{W_E} = \frac{W_E - Q}{W_E}} \quad \text{soit} \quad \boxed{\eta = \frac{E}{U}}$$

Le moteur

- Un moteur convertit une partie de la puissance électrique reçue $\mathcal{P}_E = U \cdot I$ en **puissance électromagnétique** :

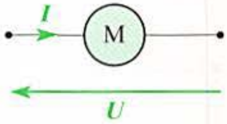
$$\boxed{\mathcal{P}_{Em} = E \cdot I}$$

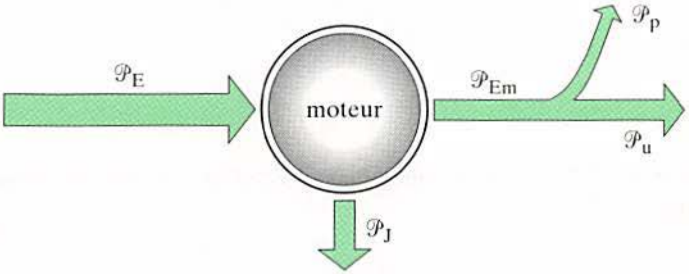
Une partie de la puissance électromagnétique fournie $\mathcal{P}_{Em}$ est perdue à cause des frottements et des effets électromagnétiques.

- La puissance mécanique disponible sur l'arbre est la **puissance mécanique utile** : $\mathcal{P}_u$.

- La loi de fonctionnement du moteur électrique est :

$$\boxed{U = E + r \cdot I}$$





- La puissance électrique est : $\boxed{\mathcal{P}_E = U \cdot I}$

- La puissance électromagnétique est : $\boxed{\mathcal{P}_{Em} = E \cdot I}$

- La puissance Joule est : $\boxed{\mathcal{P}_J = r \cdot I^2}$

- $\mathcal{P}_E = \mathcal{P}_{Em} + \mathcal{P}_J = \mathcal{P}_p + \mathcal{P}_u + \mathcal{P}_J$, $\mathcal{P}_p$ désignant les pertes dues aux frottements et aux effets électromagnétiques (pertes électromécaniques).

- Le rendement du moteur est :

$$\boxed{\eta = \frac{\mathcal{P}_u}{\mathcal{P}_E} = 1 - \frac{\mathcal{P}_J + \mathcal{P}_p}{\mathcal{P}_E}}$$

■ En courant alternatif, sinusoïdal, la puissance moyenne consommée par un récepteur est donnée par :

$$\boxed{\mathcal{P} = U \cdot I \cdot \cos \varphi}$$

où U est la valeur efficace de la tension sinusoïdale et I celle de l'intensité ; $\cos \varphi$ est le **facteur de puissance** du récepteur.
U et I sont mesurées avec un voltmètre et un ampèremètre utilisés en mode alternatif.

■ La grandeur $\mathcal{P}_S = U \cdot I$ est la **puissance apparente** ; elle est mesurée en voltampère (V. A).

■ La puissance moyenne $\mathcal{P}$ est mesurée en watt (W) avec un wattmètre.

■ Le rapport $\frac{\mathcal{P}}{\mathcal{P}_S}$ est égal au facteur de puissance :

$$\boxed{\frac{\mathcal{P}}{\mathcal{P}_S} = \cos \varphi}$$

■ En courant alternatif, la puissance dissipée par effet Joule dans un conducteur ohmique ($\cos \varphi = 1$) est :

$$\boxed{\mathcal{P}_J = U \cdot I}$$

soit :

$$\boxed{\mathcal{P}_J = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R}}$$

Effet Joule

10.1 Ampoule de voiture

Une lampe d'automobile pour éclairage longue portée a une puissance $\mathcal{P} = 55$ W . Elle est alimentée sous une tension $U = 12$ V .

1° Quelle est l'intensité du courant dans le filament de la lampe en fonctionnement ?

2° La lampe peut être assimilée à un conducteur ohmique de résistance R . Calculer R .

3° Schématiser les transferts d'énergie pour la lampe.

4° Déterminer l'énergie dissipée par les deux phares comportant des lampes identiques à celle-ci, fonctionnant pendant 6 h .

10.2 Chauffe-eau électrique

Un chauffe-eau électrique comporte une résistance $R = 16\ \Omega$ alimentée sous une tension alternative sinusoïdale de valeur efficace $U = 220$ V.

1° Calculer la puissance électrique moyenne du chauffe-eau.

2° Déterminer :

a) L'énergie électrique consommée pendant une durée de fonctionnement de 6 h .

b) La quantité de chaleur transférée à l'eau pendant cette durée, sachant que le rendement est égal à 0,95 .

3° Évaluer l'élévation de température de l'eau.

Données : capacité thermique massique de l'eau = 4 180 J . kg^{-1} . $°\text{C}^{-1}$; capacité du chauffe-eau = 250 L .

Aide : $Q = m \cdot c \cdot (\theta_f - \theta_i)$: quantité de chaleur transférée à un corps de masse m , de capacité thermique massique c , dont la température varie de θ_i à θ_f .

10.3 Partie chauffage d'un lave-linge

La puissance thermique d'un lave-linge est : $\mathcal{P} = 2{,}65$ kW .
La résistance chauffante est alimentée sous la tension du secteur : $U = 220$ V.

1° Que représente la grandeur notée U ?

2° Calculer :

a) la valeur R de la résistance ;

b) la valeur efficace de l'intensité du courant qui la traverse.

3° Déterminer la durée nécessaire pour amener un volume $V = 75$ L d'eau de 15 °C à 40 °C, sachant que le rendement du transfert est égal à 0,92 .
Données : capacité thermique massique de l'eau $c \approx 4{,}2\ \text{kJ} \,.\, \text{kg}^{-1} \,.\, \text{K}^{-1}$; masse volumique de l'eau $\rho = 1{,}0 \,.\, 10^3\ \text{kg} \,.\, \text{m}^{-3}$.

Électrolyseur

10.4 Un électrolyseur a une force électromotrice $E = 1{,}6$ V et une résistance interne $r = 1{,}7\ \Omega$.

1° Représenter le schéma indiquant les transferts d'énergie de ce récepteur.

2° *a*) Établir, sous forme littérale, le bilan de puissance de l'électrolyseur.

b) En déduire la relation entre la tension U_{AK} aux bornes de l'électrolyseur, l'intensité I du courant et les paramètres caractéristiques (E, r) de l'électrolyseur.

3° La tension aux bornes est $U_{AK} = 3{,}0$ V . Déterminer :

a) la valeur de l'intensité I ;

b) la puissance utile ;

c) la puissance électrique consommée ;

d) le rendement de ce convertisseur.

Moteurs

10.5 Démarreur d'automobile

Le démarreur d'une automobile est constitué par un moteur électrique à courant continu et aimant permanent ; il est relié à la batterie d'accumulateurs. Lors d'un démarrage, la batterie délivre un courant $I = 125$ A pendant une durée $\Delta t = 0{,}5$ s . La tension aux bornes de ce moteur est $U = 12$ V .

1° Calculer :

a) la puissance électrique du démarreur ;

b) l'énergie consommée par celui-ci.

2° Le rendement du moteur est $\eta = 0{,}65$.

a) Donner la définition du rendement.

b) Déterminer la puissance mécanique utile.

c) Indiquer l'origine des différentes pertes dans le moteur.

♦ 10.6 Moteur de perceuse

Le moteur d'une mini-perceuse a une résistance interne $r \approx 5\ \Omega$.

1° Lorsque le rotor tourne à vide, c'est-à-dire sans fournir de travail mécanique sur l'arbre de sortie, avec la vitesse angulaire constante $\omega = 1\ 000\ \text{rad.s}^{-1}$, la tension aux bornes du moteur est $U_{M_0} = 10{,}4\ \text{V}$ et l'intensité du courant est $I_0 = 0{,}270\ \text{A}$.

a) Le moteur fournit-il du travail mécanique dans ces conditions de fonctionnement ? Pourquoi ?

b) Établir le bilan de puissance du moteur.

c) Déterminer les valeurs numériques des différentes puissances transférées.

d) Dans ces conditions, que vaut la f.e.m. E_0 du moteur ?

2° Le moteur tourne avec la même vitesse angulaire que précédemment, tout en fournissant un travail mécanique sur l'arbre de sortie. La tension aux bornes du moteur est alors $U_{M_1} = 15{,}2\ \text{V}$ et l'intensité du courant $I_1 = 1{,}25\ \text{A}$.

a) Établir le bilan de puissance du moteur.

b) Déterminer les valeurs numériques des différentes puissances transférées. Pour cela, faire l'hypothèse que les pertes électromécaniques n'ont pas changé, la vitesse de rotation ayant été maintenue à sa valeur initiale.

c) Évaluer numériquement la force électromotrice E_1 du moteur et la comparer à E_0.

d) Calculer le rendement : $\eta_M = \dfrac{\mathcal{P}_u}{\mathcal{P}_E}$ du moteur.

♦♦ 10.7 Moteur à courant continu

Pour établir le bilan de puissance d'un petit moteur à courant continu et à aimant permanent, on a réalisé les expériences et les mesures suivantes :

Expérience 1 : rotor du moteur bloqué : intensité du courant $I_b = 0{,}75\ \text{A}$; tension aux bornes du moteur $U_{M_b} = 0{,}90\ \text{V}$.

Expérience 2 : rotor du moteur tournant à vide à la vitesse angulaire $\omega = 225\ \text{rad.s}^{-1}$: $I_0 = 0{,}72\ \text{A}$; $U_{M_0} = 3{,}2\ \text{V}$.

Expérience 3 : rotor du moteur tournant à la vitesse angulaire $\omega = 225 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ et fournissant un travail mécanique sur l'arbre de sortie : montée d'une masse $m = 200$ g à vitesse constante d'une hauteur $h = 1{,}8$ m pendant la durée $\Delta t_1 = 2{,}2$ s ; intensité du courant $I_1 = 1{,}2$ A ; tension aux bornes du moteur $U_{M_1} = 4{,}2$ V.

1° Déterminer la valeur de la résistance interne du moteur.

2° Évaluer la puissance correspondant aux pertes électromécaniques à la vitesse de rotation $\omega = 225 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$.

3° Faire l'hypothèse que les pertes électromécaniques ne dépendent pas de la vitesse de rotation du rotor.

a) Établir le bilan de puissance du moteur.

b) Évaluer la puissance mécanique utile fournie par le moteur dans l'*expérience 3*.

c) Calculer le rendement η_M du moteur.

4° Évaluer le travail mécanique utile fourni au cours de l'*expérience 3* :

a) à partir des mesures électriques ;

b) à partir des mesures purement mécaniques.

Donnée : intensité de la pesanteur : $g = 9{,}8 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

c) Écrire une conclusion.

♦♦ 10.8 Moteur à courant alternatif

Un moteur électrique fonctionnant en courant alternatif sinusoïdal monophasé porte les indications suivantes : tension nominale = 220 V ; intensité nominale = 6 A ; facteur de puissance $\cos \varphi = 0{,}83$; puissance mécanique nominale = 1,2 ch.

1° *a*) Rappeler la relation définissant la puissance électrique moyenne consommée en courant alternatif sinusoïdal monophasé.

b) Préciser les noms des différentes grandeurs qui y figurent.

2° Calculer la puissance moyenne consommée par le moteur dans les conditions nominales.

3° *a*) À quelle grandeur correspond la dernière donnée ?

b) Calculer cette grandeur dans le système international d'unités.

c) Évaluer le rendement de ce moteur.

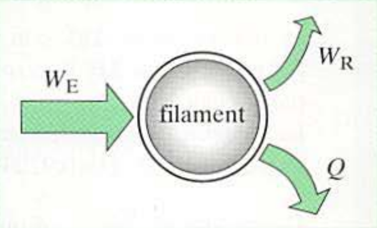
4° Déterminer le travail mécanique transféré à une pompe pendant une durée de fonctionnement de 4 h.

Donnée : 1 ch $\triangleq$ 736 W. (1 ch équivaut à 736 W.)

10.1 1° $\mathcal{P}=U\,.\,I$; $I=\dfrac{\mathcal{P}}{U}$, d'où $I=\dfrac{55}{12}=4{,}58$, soit $\boldsymbol{I=4{,}6\ \mathrm{A}}$.

2° D'après la loi d'Ohm, $R=\dfrac{U}{I}=\dfrac{U^2}{\mathcal{P}}$, d'où $R=\dfrac{12^2}{55}=2{,}618$, soit $\boldsymbol{R\approx 2{,}6\ \Omega}$.

3° Le cercle symbolise le convertisseur et les flèches les transferts.



4° $W_E=(\mathcal{P}_1+\mathcal{P}_2)\,.\,\Delta t=2\mathcal{P}\,.\,\Delta t$

$W_E=2\times 55\times 6\times 3\,600$,

d'où $W_E=2{,}376\,.\,10^6$,

soit $\boldsymbol{W_E\approx 2{,}4\,.\,10^6\ \mathrm{J}}$.

10.2 1° La puissance moyenne consommée en courant alternatif sinusoïdal est : $\mathcal{P}_E=U\,.\,I\,.\cos\varphi=R\,.\,I^2=\dfrac{U^2}{R}$, car $\cos\varphi=1$ pour une résistance.

D'où $\mathcal{P}_E=\dfrac{220^2}{16}=3\,025$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_E=3\,025\ \mathrm{W}}$.

2° *a*) L'énergie consommée est : $W_E=\mathcal{P}_E\,.\,\Delta t$.

Donc $W_E=3\,025\times 6\times 3\,600=6{,}534\,.\,10^7$, soit $\boldsymbol{W_E\approx 6{,}53\,.\,10^7\ \mathrm{J}}$,

ou bien $W_E=3\,025\times 6=1{,}815\,.\,10^4$, soit $\boldsymbol{W_E\approx 1{,}81\,.\,10^4\ \mathrm{Wh}}$.

b) Le rendement du transfert est : $\eta=\dfrac{Q}{W_E}$.

$Q=\eta\,.\,W_E$, d'où $Q=0{,}95\times 6{,}53\,.\,10^7=6{,}20\,.\,10^7$,

soit $\boldsymbol{Q\approx 6{,}20\,.\,10^7\mathrm{J}}$.

3° L'élévation de température $\Delta\theta$ est reliée à la quantité de chaleur Q et à la masse d'eau m par : $Q=m\,.\,c\,.\,\Delta\theta$, avec $m=\rho\,.\,V$ et $\rho=1\ \mathrm{kg}\,.\,\mathrm{L}^{-1}$.

Donc $\Delta\theta=\dfrac{Q}{m\,.\,c}$, d'où $\Delta\theta=\dfrac{6{,}20\,.\,10^7}{250\times 4\,180}\approx 59{,}3$,

soit $\boldsymbol{\Delta\theta=59{,}3\ ^\circ\mathrm{C}}$.

10.3 1° La grandeur notée U est la **valeur efficace de la tension alternative sinusoïdale** ; elle est mesurée à l'aide d'un voltmètre.

2° *a*) En courant alternatif sinusoïdal, la puissance moyenne consommée par un conducteur ohmique est : $\mathcal{P}_E=R\,.\,I^2=\dfrac{U^2}{R}$.

D'où $R = \dfrac{U^2}{\mathcal{P}_E} = \dfrac{220^2}{2{,}65 \, . \, 10^3} = 18{,}26$, soit $\boldsymbol{R \approx 18{,}3\ \Omega}$.

b) D'après la loi d'Ohm, pour les valeurs efficaces, $U = R \, . \, I$.

Donc $I = \dfrac{U}{R} = \dfrac{220}{18{,}3} = 12{,}02$, soit $\boldsymbol{I \approx 12\ \mathrm{A}}$.

3° La quantité de chaleur Q transférée à l'eau est :

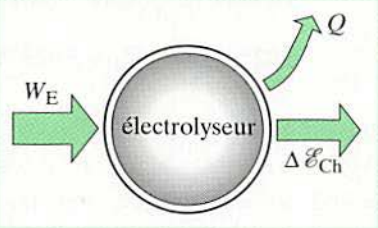
$$Q = m \, . \, c \, . \, \Delta\theta,$$

où m est la masse (kg), c la capacité thermique massique ($\mathrm{J \, . \, kg^{-1} \, . \, K^{-1}}$, ou $\mathrm{J \, . \, kg^{-1} \, . \, {}^\circ C^{-1}}$), $\Delta\theta$ l'accroissement de la température (°C), et Q la quantité de chaleur (J).
Le rendement du transfert entre la résistance chauffante et l'eau étant 0,92, on a la relation : $Q = 0{,}92 \, . \, W_E = 0{,}92 \, . \, \mathcal{P}_E \, . \, \Delta t$, où Δt est la durée (s).

Donc $\Delta t = \dfrac{Q}{0{,}92 \, . \, \mathcal{P}_E}$, d'où $\Delta t = \dfrac{75 \times 4{,}2 \, . \, 10^3 \times (40 - 15)}{0{,}92 \times 2{,}65 \, . \, 10^3} = 3\,230$,

soit $\boldsymbol{\Delta t \approx 3\,230\ \mathrm{s}}$, c'est-à-dire environ **54 min**.

10.4 1°



2° *a*) Le bilan de puissance de l'électrolyseur est :

$$\mathcal{P}_{\text{reçue}} = \mathcal{P}_{\text{convertie}} = \mathcal{P}_J + \mathcal{P}_{Ch},$$

d'où $\boldsymbol{U_{AK} \, . \, I = r \, . \, I^2 + E \, . \, I}$.

b) En divisant par I les deux membres de la relation précédente, on obtient :

$$\boldsymbol{U_{AK} = r \, . \, I + E}.$$

3° *a*) $I = \dfrac{U_{AK} - E}{r}$, d'où $I = \dfrac{3{,}0 - 1{,}6}{1{,}7} = 0{,}823\,5$, soit $\boldsymbol{I \approx 0{,}82\ \mathrm{A}}$.

b) $\mathcal{P}_u = \mathcal{P}_{Ch} = E \, . \, I$, d'où $\mathcal{P}_u = 1{,}6 \times 0{,}82 = 1{,}312$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_u \approx 1{,}3\ \mathrm{W}}$.

c) $\mathcal{P}_E = U_{AK} \, . \, I$, d'où $\mathcal{P}_E = 3{,}0 \times 0{,}82 = 2{,}46$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_E = 2{,}5\ \mathrm{W}}$.

d) Le rendement de ce convertisseur est :

$\eta = \dfrac{\mathcal{P}_u}{\mathcal{P}_E} = \dfrac{E}{U}$, d'où $\eta = \dfrac{1{,}3}{2{,}5} \approx 0{,}52$, soit $\boldsymbol{\eta \approx 0{,}52 \approx 52\ \%}$.

10.5 1° *a*) $\mathcal{P}_E = U.I$, d'où $\mathcal{P}_E = 12 \times 125 = 1\,500$, soit $\mathcal{P}_E = \mathbf{1\,500\ W}$.

b) $W_E = \mathcal{P}_E . \Delta t$, d'où $W_E = 1\,500 \times 0{,}5 = 750$, soit $W_E = \mathbf{750\ J}$.

2° *a*) **Le rendement η du moteur est égal au rapport de la puissance mécanique disponible sur l'arbre en sortie du moteur, ou puissance mécanique utile $\mathcal{P}_u$, à la puissance électrique reçue par le moteur :**

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_u}{\mathcal{P}_E}.$$

b) $\mathcal{P}_u = \eta . \mathcal{P}_E$, d'où $\mathcal{P}_u = 0{,}65 \times 1\,500 = 975$, soit $\mathcal{P}_u = \mathbf{975\ W}$.

c) Les pertes dans le moteur sont **les pertes électriques par effet Joule, les pertes dans le fer** ou **pertes électromagnétiques**, et **les pertes dues aux frottements de l'arbre sur les paliers**.

10.6 1° *a*) Le moteur, lorsqu'il tourne à vide, fournit du travail mécanique qui n'est pas du travail utile.

Il tourne à vitesse constante ; la somme des moments des couples appliqués sur l'arbre est donc nulle.

Le couple électromagnétique moteur est compensé par le couple de perte dû aux frottements et aux pertes dans le fer.

Le travail du couple électromagnétique est égal au travail du couple de perte (travail perdu).

b) Schématisons le bilan de puissance :

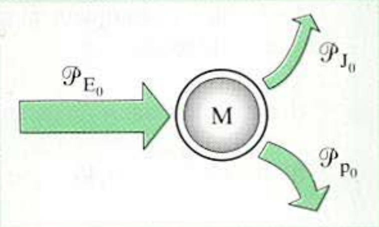
$$\mathcal{P}_{E_0} = \mathcal{P}_{J_0} + \mathcal{P}_{p_0}.$$

$\mathcal{P}_{E_0}$ est la puissance électrique ;

$\mathcal{P}_{J_0}$ est la puissance joule ;

$\mathcal{P}_{p_0}$ est la puissance électromagnétique perdue.

À vide, la puissance mécanique utile est nulle.



c) $\mathcal{P}_{E_0} = U_{M_0} . I_0$, d'où $\mathcal{P}_{E_0} = 10{,}4 \times 0{,}270 = 2{,}808$, soit $\mathcal{P}_{E_0} \approx \mathbf{2{,}81\ W}$.

$\mathcal{P}_{J_0} = r . I_0^2$, d'où $\mathcal{P}_{J_0} = 5 \times (0{,}270)^2 = 0{,}364\,5$, soit $\mathcal{P}_{J_0} \approx \mathbf{0{,}365\ W}$.

$\mathcal{P}_{p_0} = \mathcal{P}_{E_0} - \mathcal{P}_{J_0}$, d'où $\mathcal{P}_{p_0} = 2{,}81 - 0{,}365 = 2{,}445$, soit $\mathcal{P}_{p_0} \approx \mathbf{2{,}44\ W}$.

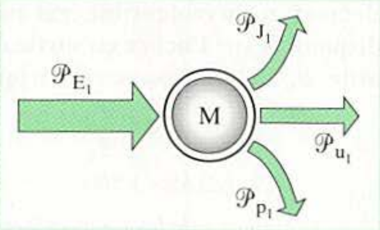
d) La f.e.m. E_0 du moteur est reliée à la puissance électromagnétique $\mathcal{P}_{Em_0}$ et à l'intensité I_0 du courant par $\mathcal{P}_{Em_0} = E_0 . I_0$.

Comme $\mathcal{P}_{Em_0} = \mathcal{P}_{p_0}$, on a $\mathcal{P}_{p_0} = E_0 . I_0$, donc $E_0 = \dfrac{\mathcal{P}_{Em_0}}{I}$,

d'où $E_0 = \dfrac{2{,}44}{0{,}270} = 9{,}037$, soit $\mathbf{E_0 \approx 9{,}04\ V}$.

2° *a*) Schématisons le bilan de puissance :

$$\mathcal{P}_{E_1} = \mathcal{P}_{J_1} + \mathcal{P}_{p_1} + \mathcal{P}_{u_1}.$$



b) ■ $\mathcal{P}_{E_1} = U_{M_1} . I_1$, d'où $\mathcal{P}_{E_1} = 15{,}2 \times 1{,}25 = 19{,}0$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_E = 19{,}0\ W}$.

■ $\mathcal{P}_{J_1} = r . I_1^2$, d'où $\mathcal{P}_{J_1} = 5 \times 1{,}25^2 = 7{,}812$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_J \approx 7{,}81\ W}$.

■ $\mathcal{P}_{p_1} = \mathcal{P}_{p_0}$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{p_1} \approx 2{,}44\ W}$.

■ $\mathcal{P}_{u_1} = \mathcal{P}_{E_1} - (\mathcal{P}_{J_1} + \mathcal{P}_{p_1})$, d'où $\mathcal{P}_{u_1} = 19{,}0 - (7{,}81 + 2{,}44) = 8{,}75$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{u_1} \approx 8{,}75\ W}$.

c) La f.e.m. E_1 du moteur est reliée à la puissance électromagnétique $\mathcal{P}_{Em_1}$ fournie et à l'intensité I_1 du courant par $\mathcal{P}_{Em_1} = E_1 . I_1$.
Or $\mathcal{P}_{Em_1} = \mathcal{P}_{E_1} - \mathcal{P}_{J_1} = \mathcal{P}_{p_1} + \mathcal{P}_{u_1}$, d'où $\mathcal{P}_{Em_1} = 19{,}0 - 7{,}81 \approx 11{,}2\ \text{W}$.
Donc $E_1 = \dfrac{\mathcal{P}_{Em_1}}{I_1}$, d'où $E_1 = \dfrac{11{,}2}{1{,}25} = 8{,}95$, soit $\boldsymbol{E_1 = 8{,}95\ V}$.
La f.e.m. n'a pratiquement pas varié : elle est, en effet, proportionnelle à la vitesse de rotation ω.

d) Le rendement η du moteur est donné par $\eta = \dfrac{\mathcal{P}_u}{\mathcal{P}_E}$,

d'où $\eta = \dfrac{8{,}75}{19{,}0} \approx \mathbf{0{,}46}$, soit **46 %**.

10.7 1° La résistance interne du moteur est évaluée à partir des mesures d'intensité et de tension lorsque le moteur est bloqué. Le moteur se comporte alors comme un conducteur ohmique.

$$r = \frac{U_{M_b}}{I_b}, \text{ d'où } r = \frac{0{,}90}{0{,}75} = 1{,}2, \text{ soit } \boldsymbol{r = 1{,}2\ \Omega}.$$

2° Le bilan de puissance à vide est : $\mathcal{P}_{E_0} = \mathcal{P}_{J_0} + \mathcal{P}_{p_0}$.

■ $\mathcal{P}_{E_0} = U_{M_0} . I_0$, d'où $\mathcal{P}_{E_0} = 3{,}2 \times 0{,}72 = 2{,}304$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{E_0} \approx 2{,}3\ W}$.

■ $\mathcal{P}_{J_0} = r . I_0^2$, d'où $\mathcal{P}_{J_0} = 1{,}2 \times 0{,}72^2 = 0{,}622$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{J_0} \approx 0{,}62\ W}$.

■ $\mathcal{P}_{p_0} = \mathcal{P}_{E_0} - \mathcal{P}_{J_0}$, d'où $\mathcal{P}_{p_0} = 2{,}3 - 0{,}62 = 1{,}68$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{p_0} \approx 1{,}7\ W}$.

3° *a*) Le bilan de puissance en charge est : $\mathcal{P}_{E_1} = \mathcal{P}_{J_1} + \mathcal{P}_{p_1} + \mathcal{P}_{u_1}$.

b) ■ $\mathcal{P}_{E_1} = U_{M_1} . I_1$, d'où $\mathcal{P}_{E_1} = 4{,}2 \times 1{,}2 = 5{,}04$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{E_1} \approx 5{,}0\ W}$.

■ $\mathcal{P}_{J_1} = r . I_1^2$, d'où $\mathcal{P}_{J_1} = 1{,}2 \times 1{,}2^2 = 1{,}728$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{J_1} \approx 1{,}7\ W}$.

■ $\mathcal{P}_{p_1} = \mathcal{P}_{p_0}$, car $\omega_1 = \omega_0$, d'où $\boldsymbol{\mathcal{P}_{p_1} \approx 1{,}7\ W}$.

■ $\mathcal{P}_{u_1} = \mathcal{P}_{E_1} - (\mathcal{P}_{J_1} + \mathcal{P}_{p_1})$, d'où $\mathcal{P}_{u_1} = 5{,}0 - (1{,}7 + 1{,}7) = 1{,}6$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{u_1} = 1{,}6\ W}$.

c) $\eta_1 = \dfrac{\mathcal{P}_{u_1}}{\mathcal{P}_{E_1}}$, d'où $\eta_1 = \dfrac{1{,}6}{5{,}0} = 0{,}32$, soit $\boldsymbol{\eta_1 = 32\ \%}$.

4° *a*) Le travail mécanique utile W_u est donné par la relation : $W_u = \mathcal{P}_u . \Delta t$. Donc $W_{u_1} = \mathcal{P}_{u_1} . \Delta t_1$, d'où $W_{u_1} = 1{,}6 \times 2{,}2 \approx 3{,}52$, soit $\boldsymbol{W_{u_1} \approx 3{,}5\ J}$.

b) Le travail mécanique utile est égal au travail mécanique W_M effectué par la force de traction F exercée par le fil soulevant la charge.
À vitesse constante, $F = P$, où P est le poids de la charge ($P = m . g$).

Le travail effectué est donc : $W_M = m . g . h$,
d'où $W_M = 200 . 10^{-3} \times 9{,}8 \times 1{,}8 = 3{,}528$, soit $\boldsymbol{W_M \approx 3{,}5\ J}$.

c) Avec la précision des mesures, on constate que le travail mécanique utile est égal à la différence entre le travail électrique reçu par le moteur et la somme de l'énergie transférée par effet joule et de l'énergie perdue (frottements et pertes dans le fer) : **il y a bien conservation de l'énergie**.

10.8 1° *a*) La puissance électrique moyenne est donnée par :

$$\mathcal{P}_E = U . I . \cos\varphi .$$

b) U est la **valeur efficace de la tension.**
I est la **valeur efficace de l'intensité du courant.**
cos φ est le **facteur de puissance du récepteur.**

2° $\mathcal{P}_E = 220 \times 6 \times 0{,}83 = 1\,095{,}6$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_E \approx 1{,}10 . 10^3\ W}$.

3° *a*) La donnée 1,2 ch correspond à la **puissance mécanique utile**, c'est-à-dire à la puissance mécanique disponible sur l'arbre de sortie.

b) 1 ch $\triangleq$ 736 W, d'où $\mathcal{P}_u = 1{,}2 \times 736 \approx 883{,}2$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_u \approx 883\ W}$.

c) $\eta = \dfrac{\mathcal{P}_u}{\mathcal{P}_E}$, d'où $\eta = \dfrac{883}{1\,100} = 0{,}802\,7$, soit $\boldsymbol{\eta \approx 80\ \%}$.

4° Le travail mécanique transféré à la pompe est : $W_u = \mathcal{P}_u . \Delta t$.
D'où $W_u = 883 \times 4 = 3\,532$, soit $\boldsymbol{W_u = 3\,532\ W.h = 3{,}532\ kW.h}$.

11

BILAN ÉNERGÉTIQUE D'UN GÉNÉRATEUR ÉLECTRIQUE

RÉSUMÉ DU COURS

■ Un générateur électrique est un convertisseur électrique qui transforme en travail électrique :

- de l'énergie chimique : pile, accumulateur (générateurs électrochimiques) ;
- de l'énergie rayonnante : cellule ou module photovoltaïque ;
- de l'énergie mécanique : machine-génératrice à courant continu, alternateur.

■ La loi de fonctionnement d'un générateur électrochimique linéaire est de la forme :

$$\boxed{U_{PN} = E - r \cdot I}$$

Unités : U_{PN} est la tension mesurée entre les bornes positive et négative en volt (V), E est la force électromotrice en volt (V), r est la résistance interne en ohm (Ω) et I l'intensité du courant sortant par la borne positive en ampère (A).

■ La puissance utile $\mathcal{P}_\text{u}$ transférée au circuit extérieur par le générateur est la puissance électrique utilisable $\mathcal{P}_\text{E}$:

$$\boxed{\mathcal{P}_\text{E} = \mathcal{P}_\text{u} = U_{PN} \cdot I}$$

- La puissance dissipée par effet Joule à l'intérieur du générateur est :

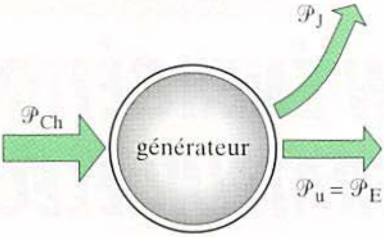
$$\boxed{\mathcal{P}_\mathrm{J} = r \,.\, I^2}$$

- La puissance chimique consommée par le générateur est :

$\mathcal{P}_\mathrm{Ch} = \mathcal{P}_\mathrm{u} + \mathcal{P}_\mathrm{J} = \mathcal{P}_\mathrm{E} + \mathcal{P}_\mathrm{J}$; soit $\mathcal{P}_\mathrm{Ch} = U_{PN} \,.\, I + r \,.\, I^2 = (U_{PN} + r \,.\, I) \,.\, I$.

Comme, d'après la loi de fonctionnement linéaire, $U_{PN} + r \,.\, I = E$, la puissance chimique consommée est :

$$\boxed{\mathcal{P}_\mathrm{Ch} = E \,.\, I}$$


$\mathcal{P}_\mathrm{J}$
$\mathcal{P}_\mathrm{Ch}$
générateur
$\mathcal{P}_\mathrm{u} = \mathcal{P}_\mathrm{E}$

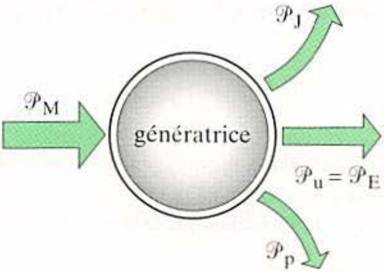
Le rendement d'un générateur électrochimique est :

$$\boxed{\eta = \frac{\mathcal{P}_\mathrm{u}}{\mathcal{P}_\mathrm{Ch}} = \frac{\mathcal{P}_\mathrm{E}}{\mathcal{P}_\mathrm{Ch}} = \frac{U_{PN}}{E}}$$

- Le principe de conservation de l'énergie appliqué à une machine-génératrice à courant continu s'écrit :

$W_\mathrm{M} = W_\mathrm{E} + W_\mathrm{J} + W_\mathrm{p}$; soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_\mathrm{M} = \mathcal{P}_\mathrm{E} + \mathcal{P}_\mathrm{J} + \mathcal{P}_\mathrm{p}}$;

$\mathcal{P}_\mathrm{M}$ est la puissance mécanique reçue par la machine ; $\mathcal{P}_\mathrm{E}$ est la puissance électrique utilisable aux bornes de la machine ; $\mathcal{P}_\mathrm{J}$ est la puissance transférée par effet Joule ; $\mathcal{P}_\mathrm{p}$ est la puissance électromécanique perdue et transférée sous forme de chaleur.


$\mathcal{P}_\mathrm{J}$
$\mathcal{P}_\mathrm{M}$
génératrice
$\mathcal{P}_\mathrm{u} = \mathcal{P}_\mathrm{E}$
$\mathcal{P}_\mathrm{p}$

Le rendement d'une génératrice est :

$$\boxed{\eta = \frac{\mathcal{P}_\mathrm{u}}{\mathcal{P}_\mathrm{M}} = \frac{\mathcal{P}_\mathrm{E}}{\mathcal{P}_\mathrm{M}}}$$

🟩 La puissance électrique moyenne fournie au circuit extérieur par un alternateur monophasé est donnée par :

$$\boxed{\mathcal{P}_{\mathrm{E}} = U \,.\, I \,.\, \cos \varphi}$$

U est la valeur efficace de la tension aux bornes de l'alternateur, I est la valeur efficace de l'intensité dans le bobinage et $\cos \varphi$ le facteur de puissance du circuit extérieur.

🟩 Le rendement d'un alternateur est :

$$\boxed{\eta = \frac{\mathcal{P}_{\mathrm{E}}}{\mathcal{P}_{\mathrm{M}}}}$$

$\mathcal{P}_{\mathrm{M}}$ est la puissance mécanique reçue par l'alternateur.

Générateurs électrochimiques

11.1 Générateur électrochimique

Un générateur électrochimique, de f.e.m. $E = 2{,}14\ \text{V}$ et de résistance interne $r = 0{,}11\ \Omega$, est branché aux bornes d'un conducteur ohmique de résistance $R = 2{,}62\ \Omega$.

1° Représenter le schéma du montage.

2° Déterminer :

a) l'expression littérale de l'intensité I en fonction de E, r et R ;

b) la valeur numérique de I.

3° Évaluer numériquement :

a) la puissance chimique consommée ;

b) la puissance électrique mise en jeu à l'extérieur du générateur ;

c) le rendement de ce générateur.

11.2 Caractéristique d'une pile

Afin de représenter la caractéristique d'une pile, on a rassemblé dans un tableau de mesures les valeurs de l'intensité I du courant fourni et la tension U_{PN} aux bornes de la pile :

I (mA)	0	50	100	150	200	250	300
U_{PN} (V)	4,52	4,42	4,33	4,23	4,14	4,04	3,95

1° Représenter le schéma du montage permettant de réaliser les mesures obtenues.

2° Construire la caractéristique intensité-tension de la pile. Prendre :
- en abscisse : $50\ \text{mm} \triangleq 100\ \text{mA}$;
- en ordonnée : $50\ \text{mm} \triangleq 0{,}50\ \text{V}$.

3° Déterminer :

a) la f.e.m. E de la pile ;

b) sa résistance interne r.

4° Établir le bilan de puissance de la pile sous forme littérale.

5° Calculer le rendement η de cette pile lorsqu'elle est parcourue par un courant $I = 150\ \text{mA}$.

♦ 11.3 Accumulateurs au plomb

Une batterie d'accumulateurs au plomb a une force électromotrice $E = 12{,}6$ V et une résistance interne $r = 0{,}09\ \Omega$. Sa capacité est $Q_0 = 75$ A . h.

1° Quelle est l'intensité I du courant transportant la quantité d'électricité $\dfrac{Q_0}{10}$ au cours d'une durée de fonctionnement $\Delta t = 10$ h ?

2° Sachant que, pendant cette durée, la f.e.m. de la batterie reste constante, déterminer :

a) la valeur de l'énergie chimique consommée ;

b) la valeur du travail électrique fourni dans le circuit extérieur à la batterie ;

c) le rendement de ce générateur.

Associations générateur - moteur

♦♦ 11.4 Générateur électrochimique

Un générateur électrochimique de f.e.m. $E = 12{,}6$ V et de résistance interne $r = 0{,}7\ \Omega$ est monté aux bornes d'un moteur de force électromotrice E' et de résistance interne r'.

1° Quand le moteur est bloqué, l'intensité du courant est $I_b = 2{,}52$ A. Déterminer la valeur de la résistance interne r' du moteur.

2° Quand le moteur tourne à vitesse constante tout en fournissant du travail mécanique sur son arbre de sortie, l'intensité du courant est $I_1 = 1{,}94$ A.

a) Déterminer la valeur de la force électromotrice E' du moteur.

b) Calculer :

- la puissance électrique utilisée à l'extérieur du générateur ;
- la puissance chimique consommée par le générateur ;
- le rendement du générateur dans ces conditions.

♦ 11.5 Alternateur monophasé

L'alternateur monophasé d'un groupe électrogène est entraîné par un moteur thermique qui lui fournit une puissance mécanique $\mathcal{P}_M = 0{,}75$ ch dans les conditions nominales de fonctionnement (220 V ; 1,8 A).

1° Quand l'alternateur alimente un radiateur électrique, la valeur efficace de l'intensité du courant est $I_1 = 1{,}8$ A et la valeur efficace de la tension de sortie de l'alternateur est $U_1 = 220$ V.

a) Calculer la puissance électrique moyenne fournie par l'alternateur.

b) Déterminer le rendement de cet alternateur.

2° L'alternateur est branché aux bornes d'un moteur dont le facteur de puissance est $\cos \varphi = 0{,}81$. Les valeurs efficaces de la tension et de l'intensité ne sont pas changées. Évaluer le rendement de l'alternateur.

Modules photovoltaïques

11.6 Une cellule photovoltaïque a une surface $S = 813\ \text{mm}^2$. Lorsqu'elle est éclairée avec un éclairement énergétique de $E = 1\,000\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, la puissance électrique maximale fournie dans le circuit extérieur est :

$$\mathcal{P}_\text{E} = 211\ \text{mW}.$$

1° Schématiser les transferts d'énergie concernant ce convertisseur.

2° Évaluer le rendement maximal de la conversion.

♦ **11.7** La caractéristique tension-intensité d'un module photovoltaïque pour un éclairement photométrique de 60 000 lux est donnée sur le graphique ci-dessous. La surface active du module est $S = 500\ \text{cm}^2$.

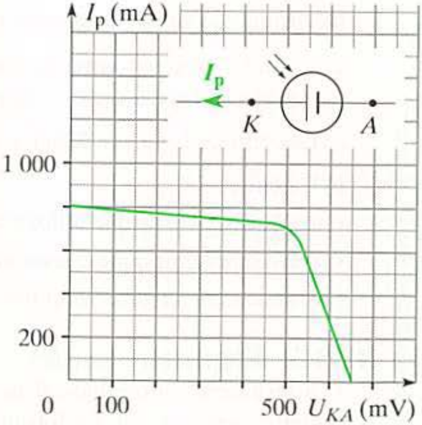
1° Indiquer :

a) la tension U_co en circuit ouvert ;

b) l'intensité I_cc de court-circuit.

2° Représenter graphiquement la puissance électrique $\mathcal{P}_\text{E}$ fournie au circuit extérieur en fonction de la tension U_{KA} aux bornes du module photovoltaïque.

3° Déterminer la puissance maximale $\mathcal{P}_{\text{E}_\text{max}}$ et les valeurs I_max et U_max correspondant à celle-ci.



4° Trouver la valeur de la résistance R du conducteur ohmique qu'il faudrait brancher en série, avec le module, pour obtenir la puissance maximale $\mathcal{P}_{\text{E}_\text{max}}$.

5° Évaluer le rendement maximal η_max du module photovoltaïque.

Donnée : $1\ \text{lux} \triangleq 1{,}5 \cdot 10^{-3}\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Génératrice à courant continu

♦♦ **11.8** Une machine à courant continu et aimant permanent a une résistance interne $r = 4{,}5\ \Omega$. Elle est entraînée par un moteur.

1° Ses bornes n'étant pas reliées à un circuit extérieur, elle est maintenue à la vitesse de rotation $N = 1\,500\ \text{tr}\cdot\text{min}^{-1}$.
Elle reçoit alors une puissance mécanique $\mathcal{P}_{M_0} = 2{,}34\ \text{W}$.
La tension à ses bornes est $U_{G_0} = 7{,}21\ \text{V}$.

a) La machine à courant continu qui fonctionne en génératrice fournit-elle une puissance électrique ?

b) À quoi sert la puissance mécanique $\mathcal{P}_{M_0}$ reçue par la machine ?

c) Schématiser les transferts d'énergie dans cette machine.

2° Les bornes de la génératrice sont reliées à une résistance $R = 30{,}1\ \Omega$.
À l'aide du moteur, on maintient la vitesse de rotation à la valeur :

$$N = 1\,500\ \text{tr}\cdot\text{min}^{-1}.$$

La tension aux bornes de la machine est $U_{G_1} = 5{,}63\ \text{V}$.

a) Calculer la puissance électrique fournie par la génératrice au circuit extérieur.

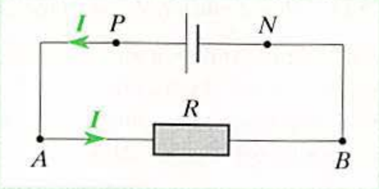
b) Déterminer les pertes Joule dans la machine.

c) Faire une hypothèse et évaluer les autres pertes énergétiques.

d) Établir le bilan de puissance de la génératrice. Calculer la puissance mécanique fournie à la génératrice par le moteur.

e) Calculer son rendement.

11.1 **1°** Schéma du montage :



2° *a*) Aux bornes du générateur : $U_{PN} = E - r \, . \, I$.
Aux bornes du conducteur ohmique : $U_{AB} = R \, . \, I$.
(PA) et (BN) étant des fils de connexion :
$U_{PA} = U_{BN} = 0$, donc $U_{PN} = U_{AB}$,

d'où $E - r \, . \, I = R \, . \, I$, soit $\boldsymbol{I = \dfrac{E}{R+r}}$.

b) $I = \dfrac{2{,}14}{2{,}62 + 0{,}11} = 0{,}783\,8$, soit $I \approx \mathbf{0{,}784\ A}$.

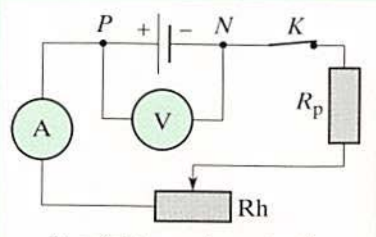
3° *a*) La puissance chimique consommée est $\mathcal{P}_{\text{Ch}} = E \, . \, I$.
$\mathcal{P}_{\text{Ch}} = 2{,}14 \times 0{,}784 = 1{,}678$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{\text{Ch}} \approx 1{,}68\ \text{W}}$.

b) La puissance électrique mise en jeu à l'extérieur est :
$\mathcal{P}_{\text{E}} = U_{PN} \, . \, I = U_{AB} \, . \, I = R \, . \, I^2$, d'où $\mathcal{P}_{\text{E}} = 2{,}62 \times 0{,}784^2 = 1{,}610$,
soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{\text{E}} = 1{,}61\ \text{W}}$.

c) Le rendement du générateur est $\eta = \dfrac{\mathcal{P}_{\text{u}}}{\mathcal{P}_{\text{Ch}}} = \dfrac{\mathcal{P}_{\text{E}}}{\mathcal{P}_{\text{Ch}}}$,

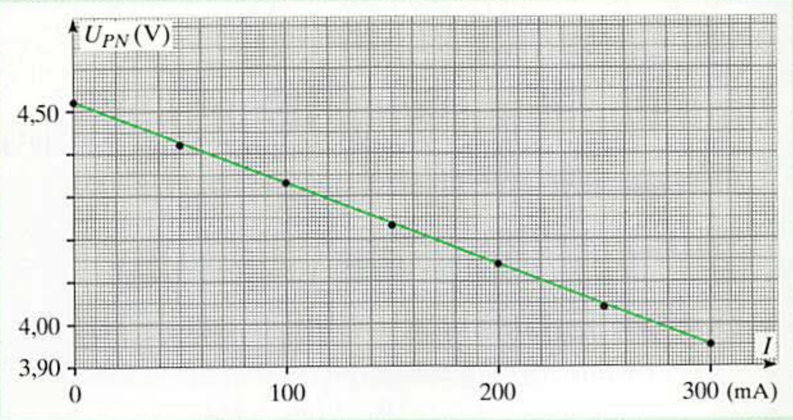
d'où $\eta = \dfrac{1{,}61}{1{,}68} \approx 0{,}958$, soit $\boldsymbol{\eta \approx 96\ \%}$.

11.2 **1°** Schéma du montage :



R_{p} : résistance de protection
Rh : rhéostat

2° Tracé de la caractéristique intensité-tension :



Avec la graduation donnée pour l'axe des ordonnées, il est souhaitable de graduer à partir de $U = 3{,}90$ V.

3° *a*) La f.e.m. de la pile est mesurée par l'ordonnée à l'origine : $\boldsymbol{E = 4{,}52}$ **V**.

b) La résistance interne est égale à la valeur absolue du coefficient directeur de la droite tracée.

$$r = \left|\frac{3{,}95 - 4{,}52}{0{,}300 - 0}\right| = 1{,}9, \quad \text{soit } \boldsymbol{r = 1{,}9\,\Omega}.$$

4° Bilan de puissance de la pile : $\mathcal{P}_{\text{Ch}} = \mathcal{P}_{\text{E}} + \mathcal{P}_{\text{J}}$, avec $\mathcal{P}_{\text{Ch}} = E\,.\,I$.
$\mathcal{P}_{\text{E}} = U_{PN}\,.\,I$ et $\mathcal{P}_{\text{J}} = r\,.\,I^2$.
On obtient donc $\boldsymbol{E\,.\,I = U_{PN}\,.\,I + r\,.\,I^2}$.

5° $\eta = \dfrac{\mathcal{P}_{\text{E}}}{\mathcal{P}_{\text{Ch}}} = \dfrac{U_{PN}}{E}$.
$U_{PN} = E - r\,.\,I$, d'où $U_{PN} = 4{,}52 - 1{,}9 \times 0{,}15 = 4{,}23$, soit $U_{PN} = 4{,}23$ V.
Donc $\eta = \dfrac{4{,}23}{4{,}52} = 0{,}936$, soit $\boldsymbol{\eta \approx 94\ \%}$.

11.3 1° $I = \dfrac{Q}{\Delta t}$; or $Q = \dfrac{Q_0}{10} = 7{,}5$ A.h, d'où $I = \dfrac{7{,}5}{10} = 0{,}75$, soit $\boldsymbol{I = 0{,}75}$ **A**.

2° Le bilan de puissance de la batterie est : $\mathcal{P}_{\text{Ch}} = \mathcal{P}_{\text{E}} + \mathcal{P}_{\text{J}}$.
De plus $\mathcal{P}_{\text{Ch}} = E\,.\,I$ et $\mathcal{P}_{\text{E}} = U_{PN}\,.\,I$.
Pendant la durée de fonctionnement indiquée, $E = 12{,}6$ V et $I = 0{,}75$ A.
Comme $U_{PN} = E - r\,.\,I$, on obtient $U_{PN} = 12{,}6 - 0{,}09 \times 0{,}75 \approx 12{,}5$ V.
Donc $\mathcal{P}_{\text{E}} = 12{,}5 \times 0{,}75 = 9{,}38$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{\text{E}} = 9{,}38}$ **W**.

a) L'énergie chimique consommée est :

$$\Delta\mathcal{E}_{\mathrm{Ch}} = \mathcal{P}_{\mathrm{Ch}} \,.\, \Delta t = E \,.\, I \,.\, \Delta t = E \,.\, \frac{Q_0}{10}.$$

Or $\dfrac{Q_0}{10} = 7{,}5\ \mathrm{A\,.\,h} = 7{,}5 \times 3\,600 = 27\,000\ \mathrm{C}$.

Donc $\Delta\mathcal{E}_{\mathrm{Ch}} = 12{,}6 \times 27\,000 = 3{,}40 \,.\, 10^5$, soit $\boldsymbol{\Delta\mathcal{E}_{\mathrm{Ch}} = 3{,}40 \,.\, 10^5\ \mathrm{J}}$.

b) Le travail électrique fourni est :

$$W_{\mathrm{E}} = \mathcal{P}_{\mathrm{E}} \,.\, \Delta t = U_{PN} \,.\, I \,.\, \Delta t = U_{PN} \frac{Q_0}{10},$$

d'où $W_{\mathrm{E}} = 12{,}5 \times 7{,}5 \times 3\,600 = 3{,}3 \,.\, 10^5$,

soit $\boldsymbol{W_{\mathrm{E}} \approx 3{,}38 \,.\, 10^5\ \mathrm{J}}$.

c) Le rendement η du générateur est :

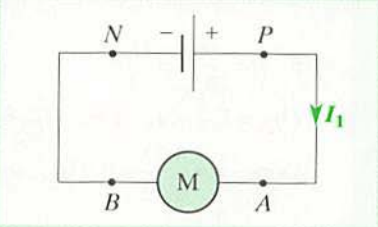
$$\eta = \frac{W_{\mathrm{E}}}{\Delta\mathcal{E}_{\mathrm{Ch}}} = \frac{\mathcal{P}_{\mathrm{E}}}{\mathcal{P}_{\mathrm{Ch}}} = \frac{U_{PN}}{E},$$

d'où $\eta = \dfrac{12{,}5}{12{,}6} = 0{,}992$, soit $\boldsymbol{\eta \approx 99\ \%}$.

11.4 1° Le moteur étant bloqué, il ne fournit pas de travail électromécanique. Il se comporte comme un conducteur ohmique de résistance r'. L'intensité I_{b} du courant dans le circuit est telle que : $E - r \,.\, I_{\mathrm{b}} = r' \,.\, I_{\mathrm{b}}$.

Donc $\dfrac{E}{I_{\mathrm{b}}} - r = r'$, d'où $r' = \dfrac{12{,}6}{2{,}52} - 0{,}7 = 4{,}3$,

soit $\boldsymbol{r' = 4{,}3\ \Omega}$.



2° *a*) Le moteur fournit du travail : sa f.e.m. E' n'est pas nulle.

$U_{PN} = E - r \,.\, I_1$ et $U_{AB} = E' + r' \,.\, I_1$.

Or $U_{PN} = U_{AB}$.

Donc $E - r \,.\, I_1 = E' + r' \,.\, I_1$,

soit $E' = E - (r + r') \,.\, I_1$,

d'où $E' = 12{,}6 - 5 \times 1{,}94 = 2{,}9$,

soit $\boldsymbol{E' = 2{,}9\ \mathrm{V}}$.

b) • $\mathcal{P}_{\mathrm{u}} = \mathcal{P}_{\mathrm{E}} = U_{PN} \,.\, I_1 = (E - r \,.\, I_1) \,.\, I_1$.

- $\mathcal{P}_{\mathrm{E}} = (12{,}6 - 0{,}7 \times 1{,}94) \times 1{,}94 = 21{,}809$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{\mathrm{E}} \approx 21{,}8\ \mathrm{W}}$.
- $\mathcal{P}_{\mathrm{Ch}} = E \,.\, I$, donc $\mathcal{P}_{\mathrm{Ch}} = 12{,}6 \times 1{,}94 = 24{,}44$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{\mathrm{Ch}} \approx 24{,}4\ \mathrm{W}}$.
- $\eta = \dfrac{\mathcal{P}_{\mathrm{u}}}{\mathcal{P}_{\mathrm{Ch}}} = \dfrac{\mathcal{P}_{\mathrm{E}}}{\mathcal{P}_{\mathrm{Ch}}}$, d'où $\eta = \dfrac{21{,}8}{24{,}4} = 0{,}893$, soit $\boldsymbol{\eta \approx 89\ \%}$.

11.5 1° *a*) Un radiateur électrique correspond à un conducteur ohmique.
La puissance électrique moyenne est $\mathcal{P}_E = U \,.\, I$.
D'où $\mathcal{P}_E = 220 \times 1{,}8 = 396$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_E = 396\ \mathrm{W}}$.

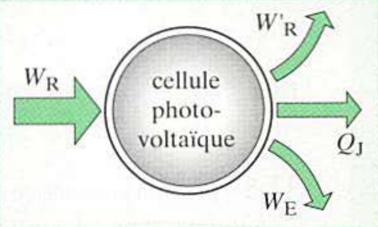
b) Le rendement η de l'alternateur est $\eta = \dfrac{\mathcal{P}_E}{\mathcal{P}_M}$.

$\mathcal{P}_M = 0{,}75 \times 736 = 552\ \mathrm{W}$, alors $\eta = \dfrac{396}{552} = 0{,}717$, soit $\boldsymbol{\eta \approx 72\ \%}$.

2° L'alternateur fonctionne dans les conditions nominales.
Il reçoit la puissance mécanique $\mathcal{P}_M = 552\ \mathrm{W}$. Il fournit la puissance électrique moyenne $\mathcal{P}_E = U \,.\, I \,.\, \cos\varphi$, d'où :
$\mathcal{P}_E = 220 \times 1{,}8 \times 0{,}81 = 320{,}76\ \mathrm{W}$, soit $\mathcal{P}_E \approx 321\ \mathrm{W}$.
Son rendement est $\eta = \dfrac{\mathcal{P}_E}{\mathcal{P}_M}$, d'où $\eta = \dfrac{321}{552} = 0{,}581$, soit $\boldsymbol{\eta \approx 58\ \%}$.

11.6 1° Schématisation des transferts énergétiques :

- W_R est l'énergie rayonnante reçue par la cellule ;
- W'_R est l'énergie rayonnante réémise ;
- Q_J est la chaleur fournie à l'extérieur.



2° Le rendement maximal est :
$\eta_{\max} = \dfrac{\mathcal{P}_{E\,\max}}{\mathcal{P}_R}$, avec $\mathcal{P}_R = E \,.\, S$.
$\mathcal{P}_R = 813 \,.\, 10^{-6} \times 1 \,.\, 10^{3} = 813 \,.\, 10^{-3}\ \mathrm{W}$, soit $813\ \mathrm{mW}$.
Donc $\eta_{\max} = \dfrac{211}{813} \approx 0{,}259$, soit $\boldsymbol{\eta_{\max} \approx 26\ \%}$.

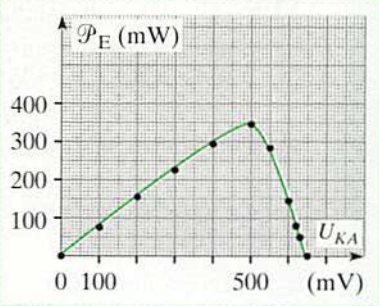
11.7 1° *a*) En circuit ouvert, $I_0 = 0$. En lisant sur le graphique, on trouve $\boldsymbol{U_{co} = 650\ \mathrm{mV}}$.

b) En court-circuit, $U_{KA} = 0$. En lisant sur le graphique, $\boldsymbol{I_{cc} = 800\ \mathrm{mA}}$.

2° Tableau des valeurs relevées à partir du graphique et résultats des calculs de $\mathcal{P}_E = U_{KA} \,.\, I_P$:

U (mV)	0	100	200	300	400	500	550	600	620	630	650
I (mA)	800	780	770	760	740	690	520	240	130	80	0
$\mathcal{P}_E$ (mW)	0	78	154	228	296	345	286	144	80	50	0

D'où le graphique $(U_{KA}, \mathcal{P}_E)$ ci-contre.



3° À partir du graphique, on peut évaluer $\mathcal{P}_{E_{max}}$.

$$\boldsymbol{\mathcal{P}_{E_{max}} \approx 345 \text{ mW}},$$

alors : $\begin{cases} I_{max} = 690 \text{ mA} \\ U_{max} = 500 \text{ mV}. \end{cases}$

4° Le conducteur ohmique est celui dont la résistance vérifie la relation :

$U_{max} = R \, . \, I_{max}$, d'où $R = \dfrac{500}{690} = 0{,}725$, soit $\boldsymbol{R = 0{,}725\ \Omega}$.

5° Le rendement η est donné par $\eta = \dfrac{\mathcal{P}_E}{\mathcal{P}_R}$.

Or $\mathcal{P}_R = E \, . \, S$,

d'où $\mathcal{P}_R = 60 \, . \, 10^3 \times 1{,}5 \, . \, 10^{-3} \times 500 \, . \, 10^{-4} = 4{,}5$ W, soit 4 500 mW.

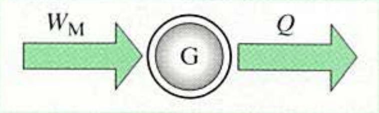
Donc $\eta_{max} = \dfrac{345}{4\,500} = 0{,}076\,6$, soit $\boldsymbol{\eta_{max} = 7{,}7\ \%}$.

11.8 **1°** *a*) La génératrice ne fournit pas de puissance en circuit ouvert car $I_G = 0$. La tension U_{G_0} est la f.e.m. à vide à la vitesse de 1 500 tr . min^{-1}.

b) La puissance mécanique $\mathcal{P}_{M_0}$ reçue est absorbée par les frottements et les pertes électromagnétiques dans le fer. Elle est convertie en chaleur.

$$\mathcal{P}_{M_0} = \mathcal{P}_{p0}.$$

c)



2° *a*) La puissance électrique fournie au circuit extérieur est $\mathcal{P}_E = \dfrac{U_G^2}{R}$,

d'où $\mathcal{P}_E = \dfrac{5{,}63^2}{30{,}1} = 1{,}053$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_E \approx 1{,}05\ \text{W}}$.

b) La puissance Joule dans la machine est $\mathcal{P}_J = r \, . \, I^2 = r \, . \left(\dfrac{U_G}{R}\right)^2$,

d'où $\mathcal{P}_J = 4{,}5 \left(\dfrac{5{,}63}{30{,}1}\right)^2 = 0{,}157$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_J = 0{,}157\ \text{W}}$.

c) La vitesse de rotation étant la même qu'à vide, on peut faire l'hypothèse que les pertes par frottements et électromagnétiques dans le fer nécessitent une puissance $\boldsymbol{\mathcal{P}_p = 2{,}34\ \mathrm{W}}$.

d) Le bilan de puissance de la génératrice s'écrit : $\mathcal{P}_{M_1} = \mathcal{P}_E + \mathcal{P}_J + \mathcal{P}_p$, d'où $\mathcal{P}_{M_1} = 1{,}05 + 0{,}157 + 2{,}34 = 3{,}547$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{M_1} \approx 3{,}55\ \mathrm{W}}$.

e) Le rendement de la génératrice est $\eta = \dfrac{\mathcal{P}_E}{\mathcal{P}_M} = \dfrac{1{,}053}{3{,}55} = 0{,}296\,6$,

soit $\boldsymbol{\eta \approx 29{,}7\ \%}$.

12

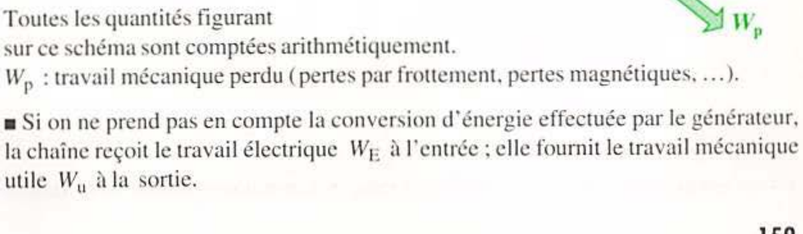
BILAN ÉNERGÉTIQUE D'UNE CHAÎNE ÉLECTRIQUE

RÉSUMÉ DU COURS

■ Une chaîne électrique est une association de convertisseurs d'énergie mettant en jeu du travail électrique et permettant d'assurer une fonction déterminée en sortie.

■ Ainsi, l'association d'un générateur électrique, d'un variateur électronique et d'une miniperceuse comportant un moteur constitue une chaîne électrique. Sa fonction est de produire du travail mécanique.

■ Le schéma des transferts énergétiques de cette chaîne est :



Toutes les quantités figurant sur ce schéma sont comptées arithmétiquement.
W_p : travail mécanique perdu (pertes par frottement, pertes magnétiques, …).

■ Si on ne prend pas en compte la conversion d'énergie effectuée par le générateur, la chaîne reçoit le travail électrique W_E à l'entrée ; elle fournit le travail mécanique utile W_u à la sortie.

- Le rendement global de la chaîne est :

$$\boxed{\eta_{\text{ch}} = \frac{W_{\text{u}}}{W_{\text{E}}}}$$

- Les rendements du variateur et du moteur étant respectivement $\eta_{\text{var}} = \frac{W'_{\text{E}}}{W_{\text{E}}}$ et $\eta_{\text{mot}} = \frac{W_{\text{u}}}{W'_{\text{E}}}$, le rendement global de la chaîne est :

$$\boxed{\eta_{\text{ch}} = \eta_{\text{var}} \cdot \eta_{\text{mot}}}$$

🟩 Plus généralement :

- Les transferts d'énergie à l'entrée et à la sortie d'une chaîne électrique ayant été identifiés, le rendement global de la chaîne est :

$$\boxed{\eta_{\text{ch}} = \frac{W_{\text{u}}}{W_{\text{e}}} = \frac{\mathcal{P}_{\text{u}}}{\mathcal{P}_{\text{e}}}}$$

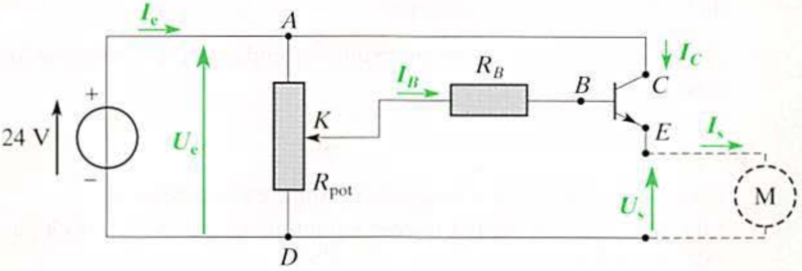
W_{u} et $\mathcal{P}_{\text{u}}$ sont le travail et la puissance **utiles** fournis en sortie, W_{e} et $\mathcal{P}_{\text{e}}$ le travail et la puissance reçus à l'entrée.

- Le rendement global d'une chaîne est égal au produit des rendements des différents convertisseurs constituant la chaîne.

Bilan énergétique de différents dispositifs électriques

12.1 Potentiomètre électronique

On se propose d'alimenter un moteur électrique à courant continu avec une tension ajustable à partir d'une tension constante de 24 V ; pour cela, on a réalisé le montage schématisé ci-dessous :



Pour une certaine position K du curseur du potentiomètre $[AD]$, on a relevé les valeurs suivantes :

- pour les intensités des courants : $I_B = 0{,}3$ mA , $I_C = 1{,}20$ A ;
- pour la tension : $U_s = 15$ V .

Les résistances du montage ont les valeurs suivantes : $R_{pot} = 1\ \text{k}\Omega$, $R_B = 470\ \Omega$.

1° Déterminer l'intensité I_{pot} du courant dans le potentiomètre.
Pour cela, faire l'hypothèse que l'intensité I_B est négligeable devant I_{pot}.

2° Calculer :

a) la puissance électrique $\mathcal{P}_e$ injectée à l'entrée ;

b) la puissance électrique $\mathcal{P}_s$ recueillie en sortie ;

c) le rendement du dispositif électronique {potentiomètre associé au transistor}.

3° Évaluer la puissance dissipée par effet joule :

a) dans le potentiomètre ;

b) dans la résistance R_B.

4° *a*) Établir le bilan de puissance du dispositif électronique.

b) En déduire la puissance dissipée dans le transistor TIP 111.

c) Comparer ce résultat avec la quantité $U_{CE} \cdot I_C$, et conclure.

×12.2 Éolienne

Un alternateur monophasé fournit une puissance électrique de 3 300 W sous une tension efficace de 220 V, avec une fréquence de 50 Hz ; son rendement est alors de 0,85. Il est entraîné par une éolienne dont le rendement vaut 0,65 dans les conditions nominales par vent de $20\ \text{m}\,.\,\text{s}^{-1}$.

1° Calculer la puissance mécanique nécessaire à l'entraînement de l'alternateur fonctionnant dans les conditions nominales.

2° Déterminer la puissance mécanique développée par le vent sur les pales de l'éolienne dans ces conditions.

3° Pourquoi faut-il prendre en compte le rendement de l'éolienne lors de sa conception ?

× ♦ 12.3 Groupe électrogène

Un groupe électrogène à usage domestique est constitué par :
- un moteur à combustion interne « 4 temps » à essence : 1,4 ch ; consommation : $0{,}4\ \text{L}\,.\,\text{h}^{-1}$;
- un alternateur : puissance nominale 600 W en 220 V ; courant alternatif sinusoïdal : 50 Hz ;
- un transformateur 220 V - 12 V ; rendement : 0,68 ;
- un redresseur-régulateur pour sortie 12 V continue ; rendement : 0,48.

1° Déterminer :

a) la puissance thermique du moteur ;

b) son rendement η_{mot}.

Données : masse volumique de l'essence : $\rho = 0{,}750\ \text{kg}\,.\,\text{L}^{-1}$; pouvoir calorifique massique de l'essence : $\text{p.c.} = 43\ \text{MJ}\,.\,\text{kg}^{-1}$; $1\ \text{ch} \approx 736\ \text{W}$.

2° Calculer le rendement de l'alternateur.

3° Déterminer le rendement de la chaîne :

a) moteur thermique - alternateur 220 V - 50 Hz ;

b) moteur thermique - alternateur - transformateur - redresseur - régulateur.

12.4 Alimentation continue stabilisée

Pour alimenter un moteur à courant continu sous une tension constante $U_{\text{mot}} = 15\ \text{V}$ à partir de la tension sinusoïdale de fréquence 50 Hz du secteur, on utilise une alimentation continue stabilisée comprenant :
- un transformateur (220 V ; 24 V) ; rendement : 0,75 ;
- un redresseur à diodes ; rendement : 0,70 ;
- un régulateur ; rendement : 0,42.

Le moteur a un rendement $\eta_{\text{mot}} = 0{,}62$.

1° Calculer la puissance électrique reçue par le moteur quand il fournit une puissance mécanique utile $\mathcal{P}_{\text{u}} = 18$ W.

2° Déterminer :

a) le rendement global η_{ch} de la chaîne constituée par l'alimentation stabilisée ;

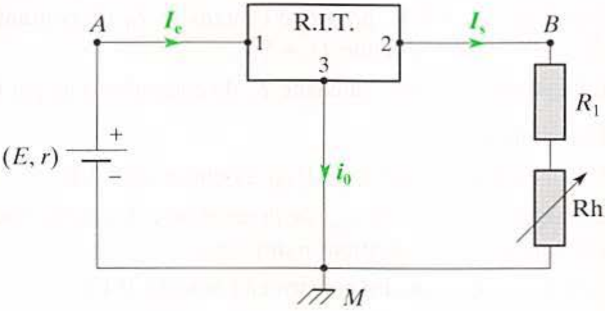
b) la puissance électrique $\mathcal{P}_{\text{e}}$ appelée à l'entrée de la chaîne lorsque le moteur fournit la puissance utile indiquée.

3° Calculer le rendement de la conversion travail électrique - travail mécanique utile.

Bilan énergétique dans les montages à régulateurs intégrés

♦ 12.5 Régulateur intégré tripolaire (R.I.T.) - Générateur idéal de tension

Un générateur de f.e.m. $E = 12{,}0$ V et de résistance interne $r = 50\ \Omega$ est branché à l'entrée d'un R.I.T. (*cf.* figure).
La résistance de charge R_{c} montée en sortie est constituée par l'association en série d'une résistance $R_1 = 68\ \Omega$ et d'un rhéostat Rh (0 ; 330 Ω).
Le R.I.T. maintient, entre ses bornes 2 et 3, une tension constante $U_{2,3} = U_0 = 5{,}0$ V tant que la tension $U_{1,2}$ reste supérieure à 2 V ; dans ces conditions, l'intensité i_0 du courant sortant par la borne 3 est négligeable devant les intensités I_{e} et I_{s} des courants d'entrée et de sortie.



1° La résistance du rhéostat est maximale : Rh = 330 Ω.

a) Calculer l'intensité I_{s} du courant de sortie.

b) Déterminer la valeur de la tension $U_{\text{e}} = U_{AM}$ à l'entrée.
Vérifier que $U_{AM} > U_{BM} + 2$ V.

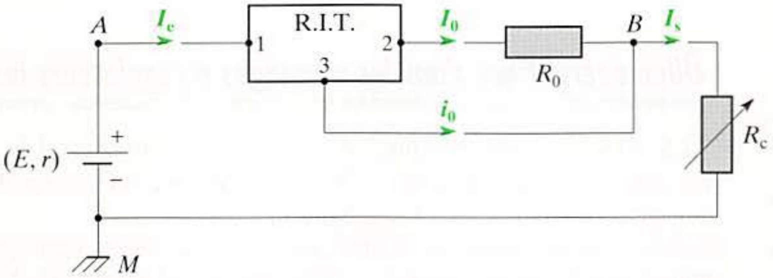
c) Évaluer :

- la puissance électrique $\mathcal{P}_e$ injectée dans le R.I.T. ;
- la puissance électrique $\mathcal{P}_s$ recueillie en sortie dans la charge ;
- le rendement η du R.I.T.

2° La résistance du rhéostat est minimale : $\mathrm{Rh} = 0\ \Omega$.
Répondre aux mêmes questions qu'en **1°**.

♦ 12.6 R.I.T. - Générateur de courant

Un régulateur intégré de tension est associé à un générateur de f.e.m. $E = 24{,}0\ \mathrm{V}$ et de résistance interne $r = 50\ \Omega$, comme indiqué sur la figure ci-dessous :



Il maintient, entre ses bornes 2 et 3, une tension $U_{2,3} = U_0$ constante tant que la tension $U_{1,2}$ reste supérieure à $1{,}4\ \mathrm{V}$. L'intensité i_0 du courant sortant par sa borne 3 est négligeable devant l'intensité I_e du courant entrant dans le R.I.T.

1° *a*) Quelle valeur faut-il donner à la résistance R_0, branchée entre les bornes 2 et 3 du R.I.T., pour que l'intensité I_0 du courant dans R_0 soit égale à $100\ \mathrm{mA}$? On donne $U_0 = 5\ \mathrm{V}$.

b) Indiquer la valeur de l'intensité I_s du courant sortant par le nœud B.

2° Déterminer :

a) la valeur de la tension $U_e = U_{AM}$ à l'entrée du R.I.T. ;

b) la valeur maximale $R_{c\max}$ de la résistance de charge pour que le R.I.T. fonctionne dans les conditions indiquées ;

c) la fonction du dispositif construit à l'aide du R.I.T.

3° La résistance de charge est $R_c = 33\ \Omega$. Déterminer :

a) la puissance électrique $\mathcal{P}_e$ injectée à l'entrée du R.I.T. ;

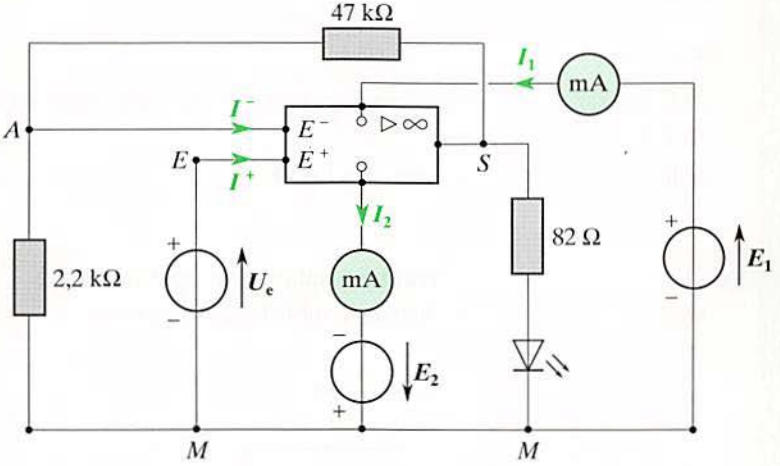
b) la puissance électrique $\mathcal{P}_s$ recueillie en sortie dans la charge ;

c) le rendement $\eta = \dfrac{\mathcal{P}_s}{\mathcal{P}_e}$ du dispositif.

Bilan énergétique dans les montages à amplificateur opérationnel

♦♦ 12.7 Montage amplificateur non inverseur

Le montage est schématisé sur la figure ci-dessous :



1° L'A.O., considéré comme idéal, fonctionne en régime linéaire.

a) Montrer que le montage, dont les bornes d'entrée sont E et M et les bornes de sortie S et M, constitue un amplificateur non inverseur.

b) Calculer son coefficient d'amplification en tension $\mathcal{A}_V$.

2° La tension $U_e = U_{EM}$ appliquée à l'entrée est $U_e = +0{,}170\ \text{V}$.

a) Calculer la tension de sortie $U_s = U_{SM}$.

b) La tension de fonctionnement de la diode électroluminescente est $U_d = 2{,}1\ \text{V}$. Déterminer la valeur de l'intensité I_s du courant de sortie entre S et M.

3° À partir des données fournies par le fabricant de l'A.O., on évalue les courants dans les entrées de l'A.O. à 20 nA environ.

Déterminer :

a) la puissance électrique $\mathcal{P}_e$ fournie à l'entrée du dispositif ;

b) la puissance électrique $\mathcal{P}_s$ recueillie en sortie ;

c) le coefficient d'amplification en puissance $\mathcal{A}_p = \dfrac{\mathcal{P}_s}{\mathcal{P}_e}$.

4° Les tensions d'alimentation de l'A.O. sont $E_1 = E_2 = 14{,}7\ \text{V}$. Les courants débités par les alimentations ont pour intensités $I_1 = 22{,}00\ \text{mA}$ et $I_2 = 1{,}19\ \text{mA}$.

Déterminer :

a) la puissance électrique fournie par les alimentations E_1 et E_2 de l'A.O. ;

b) le rendement du dispositif : $\eta = \dfrac{\mathcal{P}_s}{\mathcal{P}_{\text{alim}}}$.

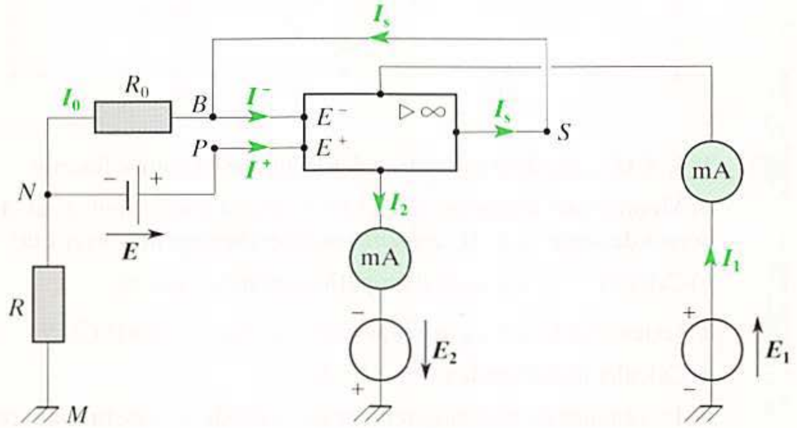
5° Évaluer :

a) la puissance $\mathcal{P}_J$ dissipée par effet joule dans les résistances du montage amplificateur ;

b) la puissance $\mathcal{P}_{AO}$ dissipée dans l'A.O.

♦♦ 12.8 Générateur de courant à amplificateur opérationnel

On a réalisé le montage schématisé sur la figure ci-dessous :



1° L'A.O., considéré comme idéal, fonctionne en régime linéaire.

a) Montrer que l'intensité du courant I_0 dans la résistance R_0 est $I_0 = \dfrac{E}{R_0}$ en indiquant le sens de I_0. E est la force électromotrice de la pile branchée entre P et N.

b) Trouver la relation entre l'intensité I_s du courant de sortie de l'A.O. et I_0.

c) Que vaut l'intensité du courant dans la résistance R ? Dépend-elle de la valeur de R ?

2° Les valeurs des composants sont : $E = 1{,}5$ V ; $R_0 = 1{,}5$ kΩ ; $R = 8{,}2$ kΩ. Les mesures des courants ont donné : $I_1 = 2{,}3$ mA ; $I_2 = 1{,}3$ mA.

a) Calculer I_0.

b) Évaluer la puissance fournie par la pile de f.e.m. E, sachant que les intensités I^- et I^+ sont de l'ordre de 20 nA.

c) Déterminer :

- la puissance recueillie dans la résistance R ;
- la puissance fournie par l'alimentation double de l'A.O., sachant que : $E_1 = E_2 = 15$ V ;
- le rendement du dispositif.

12.1 1° Si on peut négliger I_B devant I_{pot}, on a : $U_{AD} = R_{\text{pot}} \,.\, I_{\text{pot}}$,

donc $I_{\text{pot}} = \dfrac{U_{AD}}{R_{\text{pot}}}$, d'où $I_{\text{pot}} = \dfrac{24}{1\,.\,10^3} = 24\,.\,10^{-3}\ \text{A}$, soit $24\ \text{mA}$.

Comme $I_B = 0{,}3\ \text{mA}$, $\dfrac{I_B}{I_{\text{pot}}} = 0{,}012\,5$;

l'hypothèse est bien vérifiée, $\boldsymbol{I_{\text{pot}} = 24\ \text{mA}}$.

2° *a*) La puissance électrique injectée à l'entrée est $\mathcal{P}_{\text{e}} = U_{\text{e}} \,.\, I_{\text{e}}$.

La loi des nœuds appliquée en A permet d'écrire : $I_{\text{e}} = I_{\text{pot}} + I_{\text{c}}$,

d'où $I_{\text{e}} = 1\,224\ \text{mA} = 1{,}224\ \text{A}$.

Comme $U_{\text{e}} = 24\ \text{V}$ (générateur idéal de tension), $\mathcal{P}_{\text{e}} = 24 \times 1{,}224 = 29{,}376$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{\text{e}} \approx 29{,}4\ \text{W}}$.

b) La puissance recueillie en sortie est $\mathcal{P}_{\text{s}} = U_{\text{s}} \,.\, I_{\text{s}}$.

La loi de conservation de l'électricité (loi des nœuds) appliquée au transistor permet d'écrire : $I_{\text{s}} = I_B + I_{\text{c}} \approx I_{\text{c}}$.

D'où $I_{\text{s}} = 1{,}2\ \text{A}$, puis $\mathcal{P}_{\text{s}} = 15 \times 1{,}20$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{\text{s}} \approx 18{,}0\ \text{W}}$.

c) Le rendement du potentiomètre électronique est :

$\eta = \dfrac{\mathcal{P}_{\text{s}}}{\mathcal{P}_{\text{e}}}$, d'où $\eta = \dfrac{18{,}0}{29{,}4} \approx 0{,}612$, soit **61,2 %**.

3° La puissance dissipée par effet joule est :

a) Dans R_{pot} : $\mathcal{P}_{\text{J pot}} = R_{\text{pot}} \,.\, I_{\text{pot}} = \dfrac{U_{\text{e}}^2}{R_{\text{pot}}}$,

d'où $\mathcal{P}_{\text{J pot}} = \dfrac{24^2}{1\,000} \approx 0{,}58$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{\text{J pot}} \approx 0{,}6\ \text{W}}$.

b) Dans R_B : $\mathcal{P}_{\text{J}\,R_B} = R_B \,.\, I_B^2$, d'où $\mathcal{P}_{\text{J}\,R_B} = 470 \times (0{,}3\,.\,10^{-3})^2 = 4{,}2\,.\,10^{-5}$,

donc $\boldsymbol{\mathcal{P}_{\text{J}\,R_B}}$ **est négligeable**.

4° *a*) Le bilan de puissance du potentiomètre électronique s'écrit :

$$\boldsymbol{\mathcal{P}_{\text{e}} = \mathcal{P}_{\text{J pot}} + \mathcal{P}_{\text{J}\,R_B} + \mathcal{P}_{\text{TIP}} + \mathcal{P}_{\text{s}}}\,.$$

b) La puissance dissipée dans le transistor TIP 111 est :

$$\mathcal{P}_{\text{TIP}} = \mathcal{P}_{\text{e}} - (\mathcal{P}_{\text{J pot}} + \mathcal{P}_{\text{J}\,R_B} + \mathcal{P}_{\text{s}}),$$

d'où $\mathcal{P}_{\text{TIP}} = 29{,}4 - (0{,}6 + 0 + 18{,}0) \approx 10{,}8$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{\text{TIP}} = 10{,}8\ \text{W}}$.

Elle n'est pas négligeable : il faut prévoir un radiateur sur le transistor.

c) La loi d'additivité des tensions permet d'écrire :

$U_{AD} = U_{AC} + U_{CE} + U_{ED}$, soit $U_{CE} = U_{AD} - (U_{AC} + U_{ED})$,

d'où $U_{CE} = 24 - (0 + 15) = 9$ V, donc $U_{CE} \,.\, I_c = 9 \times 1{,}2 = \mathbf{10{,}8\ W}$.

La puissance dissipée par le transistor est égale à la quantité $U_{CE} \,.\, I_c$.

12.2 **1°** $\eta_{\text{alt}} = \dfrac{\mathcal{P}_E}{\mathcal{P}_M}$, donc $\mathcal{P}_M = \dfrac{\mathcal{P}_E}{\eta_{\text{alt}}}$,

d'où $\mathcal{P}_M = \dfrac{3\,300}{0{,}85} = 3\,882{,}35$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_M \approx 3\,880\ W}$.

2° $\eta_{\text{éol}} = \dfrac{\mathcal{P}_M}{\mathcal{P}_{\text{éol}}}$, donc $\mathcal{P}_{\text{éol}} = \dfrac{\mathcal{P}_M}{\eta_{\text{éol}}}$,

d'où $\mathcal{P}_{\text{éol}} = \dfrac{3\,880}{0{,}65} = 5\,972{,}31$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{\text{éol}} \approx 5\,970\ W}$.

3° Le rendement de l'éolienne présente une importance, bien que l'énergie utilisée soit renouvelable, **car l'énergie dissipée est transférée par chaleur au niveau des paliers, des engrenages et des systèmes de régulation de la vitesse de rotation**. La quantité de chaleur à évacuer et l'usure des pièces sont d'autant plus faibles que le rendement est meilleur.

12.3 **1°** *a*) La puissance thermique du moteur est $\mathcal{P}_{Th} = \mathcal{C} \,.\, \text{p.c.}$, avec $\mathcal{C}$ la consommation en $\text{kg} \,.\, \text{s}^{-1}$ et p.c. le pouvoir calorifique massique en $\text{J} \,.\, \text{kg}^{-1}$.

Or $\mathcal{C} = 0{,}4\ \text{L} \,.\, \text{h}^{-1}$ et $\rho = 0{,}750$,

d'où $\mathcal{C} = \dfrac{0{,}4 \times 0{,}750}{3\,600} \approx 8{,}33 \,.\, 10^{-5}\ \text{kg} \,.\, \text{s}^{-1}$; $\text{p.c.} = 43 \,.\, 10^6\ \text{J} \,.\, \text{kg}^{-1}$.

Donc $\mathcal{P}_{Th} = 8{,}33 \,.\, 10^{-5} \times 43 \,.\, 10^6$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{Th} \approx 3\,580\ W}$.

b) Le rendement du moteur thermique est $\eta_{\text{mot}} = \dfrac{\mathcal{P}_M}{\mathcal{P}_{Th}}$, où $\mathcal{P}_M$ est la puissance mécanique fournie.

$\mathcal{P}_M = 1{,}4 \times 736$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_M \approx 1\,030\ W}$.

$\eta_{\text{mot}} = \dfrac{1\,030}{3\,580} \approx 0{,}287$, soit **environ 29 %**.

2° L'alternateur reçoit la puissance mécanique $\mathcal{P}_M \approx 1\,030$ W et fournit la puissance électrique $\mathcal{P}_E = 600$ W dans les conditions nominales de fonctionnement.

Son rendement est :

$\eta_{\text{alt}} = \dfrac{\mathcal{P}_{\text{E}}}{\mathcal{P}_{\text{M}}}$, d'où $\eta_{\text{alt}} = \dfrac{600}{1\,030} \approx \mathbf{0{,}583}$, soit **environ 58 %**.

3° *a*) Le rendement de la chaîne moteur thermique - alternateur est :
$\eta_1 = \eta_{\text{mot}} \cdot \eta_{\text{alt}}$, d'où $\eta_1 = 0{,}287 \times 0{,}583 \approx \mathbf{0{,}167}$, soit **environ 17 %**.

b) Le rendement de la chaîne moteur thermique - alternateur - transformateur - redresseur - régulateur est :

$$\eta_2 = \eta_{\text{mot}} \cdot \eta_{\text{alt}} \cdot \eta_{\text{transfo}} \cdot \eta_{\text{red-rég}},$$

d'où $\eta_2 = 0{,}17 \times 0{,}68 \times 0{,}48 \approx \mathbf{0{,}055}$, soit **environ 5,5 %**.
Un rendement aussi faible serait inacceptable pour une installation industrielle.

12.4 **1°** Le rendement du moteur est défini par $\eta = \dfrac{\mathcal{P}_{\text{u}}}{\mathcal{P}_{\text{E}}}$,

donc $\mathcal{P}_{\text{E}} = \dfrac{\mathcal{P}_{\text{u}}}{\eta}$, d'où $\mathcal{P}_{\text{E}} = \dfrac{18}{0{,}62} \approx 29$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{\text{E}} \approx 29}$ **W**.

2° *a*) Le rendement global de la chaîne est :
$\eta_{\text{ch}} = 0{,}75 \times 0{,}70 \times 0{,}42$, d'où $\boldsymbol{\eta_{\text{ch}} \approx 0{,}22}$.

b) La puissance électrique appelée à l'entrée est $\mathcal{P}_{\text{e}}$, telle que $\dfrac{\mathcal{P}_{\text{E}}}{\mathcal{P}_{\text{e}}} = \eta_{\text{ch}}$,

donc $\mathcal{P}_{\text{e}} = \dfrac{\mathcal{P}_{\text{E}}}{\eta_{\text{ch}}}$, d'où $\mathcal{P}_{\text{e}} = \dfrac{29}{0{,}22} \approx 131{,}8$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{\text{e}} \approx 132}$ **W**.

3° Le rendement de la conversion est $\eta = \dfrac{\mathcal{P}_{\text{u}}}{\mathcal{P}_{\text{e}}}$,

donc $\eta = \dfrac{18}{132} = 0{,}136\,3$, d'où $\boldsymbol{\eta \approx 0{,}14}$, soit **environ 14 %**.

12.5 **1°** *a*) La résistance de la charge est $R_{\text{c}} = R_1 + \text{Rh}$.
$R_1 = 68\ \Omega$; $\text{Rh} = 330\ \Omega$; $R_{\text{c}} = 398\ \Omega$.
$I_{\text{s}} = \dfrac{U_{BM}}{R_{\text{c}}} = \dfrac{U_0}{R_{\text{c}}}$, d'où $I_{\text{s}} = \dfrac{5{,}0}{398} \approx 0{,}012\,56$,
soit $\boldsymbol{I_{\text{s}} \approx 0{,}013}$ **A, ou 13 mA**.

b) La tension U_{AM} aux bornes du générateur s'écrit $U_{AM} = -r \cdot I_{\text{e}} + E$.
Or $I_{\text{e}} = I_{\text{s}} + I_0 \approx I_{\text{s}}$ (le R.I.T. peut être considéré comme un nœud de courant).
Donc $U_{AM} \approx -r \cdot I_{\text{s}} + E$, d'où $U_{AM} \approx -50 \times 0{,}013 + 12{,}0 = 11{,}35$,
soit $\boldsymbol{U_{\text{e}} \approx 11{,}4}$ **V**.
$U_{AM} - U_{BM} = 11{,}4 - 5{,}0 = 6{,}4\ \text{V} > 2\ \text{V}$.

c) ■ La puissance électrique injectée dans le R.I.T. est $\mathcal{P}_e = U_e \cdot I_e$, d'où $\mathcal{P}_e = 11{,}4 \times 0{,}013 \approx 0{,}148\,2$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_e \approx 0{,}15\ \mathrm{W}}$**, ou** $\mathbf{150\ mW}$.

■ La puissance électrique recueillie en sortie dans la charge est :

$\mathcal{P}_s = U_s \cdot I_s = \dfrac{U_s^2}{R_c}$, d'où $\mathcal{P}_s = \dfrac{5{,}0^2}{398} = 0{,}062\,8$,

soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_s \approx 0{,}060\ \mathrm{W}}$**, ou** $\mathbf{60\ mW}$.

■ Le rendement du R.I.T. est $\eta = \dfrac{\mathcal{P}_s}{\mathcal{P}_e}$,

d'où $\eta = \dfrac{60}{150} = 0{,}40$, soit $\boldsymbol{\eta \approx 0{,}40}$**, ou 40 %**.

2° *a)* $R_c = 68\ \Omega$; $I_s = \dfrac{5{,}0}{68} \approx 0{,}073\,5$, soit $\boldsymbol{I_s \approx 0{,}074\ \mathrm{A}}$**, ou** $\mathbf{74\ mA}$.

b) $U_{AM} = -r \cdot I_e + E \approx -r \cdot I_s + E$;

$U_e = U_{AM} \approx -50 \times 0{,}073\,5 + 12{,}0 = 8{,}325$, soit $\boldsymbol{U_e \approx 8{,}3\ \mathrm{V}}$.

$U_{AM} - U_{BM} = 8{,}3 - 5{,}0 = 3{,}3\ \mathrm{V} > 2\ \mathrm{V}$.

c) ■ $\mathcal{P}_e = U_e \cdot I_e \approx U_e \cdot I_s$, d'où $\mathcal{P}_e = 8{,}325 \times 0{,}073\,5 \approx 0{,}611\,9$,

soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_e \approx 610\ \mathrm{mW}}$.

■ $\mathcal{P}_s = U_s \cdot I_s$, d'où $\mathcal{P}_s = 5{,}0 \times 0{,}073\,5 = 0{,}367\,5$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_s \approx 370\ \mathrm{mW}}$.

■ $\eta = \dfrac{\mathcal{P}_s}{\mathcal{P}_e}$, d'où $\eta = \dfrac{370}{610} \approx 0{,}606\,5$, soit **environ 61 %**.

12.6 **1°** *a)* La borne 3 du R.I.T. est reliée au point B par un fil de connexion : $U_{3,B} = 0$, donc $U_{2,B} = U_{2,3} + U_{3,B} = U_{2,3}$.

La loi d'Ohm permet d'écrire $U_{2,B} = R_0 \cdot I_0 = U_0$,

donc $R_0 = \dfrac{U_0}{I_0}$, d'où $R_0 = \dfrac{5{,}0}{0{,}100} = 50$, soit $\boldsymbol{R_0 = 50\ \Omega}$.

b) La loi des nœuds appliquée en B s'écrit :

$I_s = I_0 + i_0 \approx I_0$, car i_0 est négligeable.

La loi de conservation de l'électricité appliquée au R.I.T. s'écrit :

$I_e = I_0 + i_0 \approx I_0$, donc $\boldsymbol{I_e = I_s \approx I_0 = 100\ \mathrm{mA}}$.

2° *a)* $U_e = U_{AM} = -r \cdot I_e + E$,

d'où $U_e = -50 \times 0{,}100 + 24{,}0 = 19{,}0\ \mathrm{V}$, soit $\boldsymbol{U_e = 19{,}0\ \mathrm{V}}$.

b) La loi d'additivité des tensions s'écrit : $U_{AM} = U_{1,2} + U_{2,B} + U_{BM}$.

Pour que le R.I.T. fonctionne dans les conditions indiquées, il faut que la tension $U_{1,2}$ soit supérieure à 1,4 V. Il vient :

$U_{1,2} = U_{AM} - (U_{2,B} + U_{BM}) > 1{,}4\ \mathrm{V}$, avec $U_{AM} = 19{,}0$ et $U_{2,B} = 5{,}0$.

Écrivons que la condition est réalisée :

$19{,}0 - (5{,}0 + U_{BM}) > 1{,}4$, soit $U_{BM} < 19 - (5{,}0 + 1{,}4)$,
alors $U_{BM} < 12{,}6\ \text{V}$.

Comme $U_{BM} = U_s = R_c \,.\, I_s$, la valeur de R_c doit vérifier la relation :
$R_c \,.\, I_s < 12{,}6\ (\text{V})$, avec $I_s = 100\ \text{mA}$ ou $0{,}100\ \text{A}$.

Donc $R_c < \dfrac{12{,}6}{0{,}1} = 126\ \Omega$.

La valeur maximale de la résistance de charge est $R_{c\,max} = 126\ \Omega$.

c) Le dispositif réalisé est un **générateur de courant constant** : il délivre une intensité I_s constante pour une résistance de charge inférieure à $126\ \Omega$.

3° La résistance de charge est $R_c = 33\ \Omega$. Elle est inférieure à $R_{c\,max}$. Donc le R.I.T. fonctionne dans les conditions indiquées :

$$I_s = I_e = 100\ \text{mA} \quad \text{et} \quad U_e = 19{,}0\ \text{V}.$$

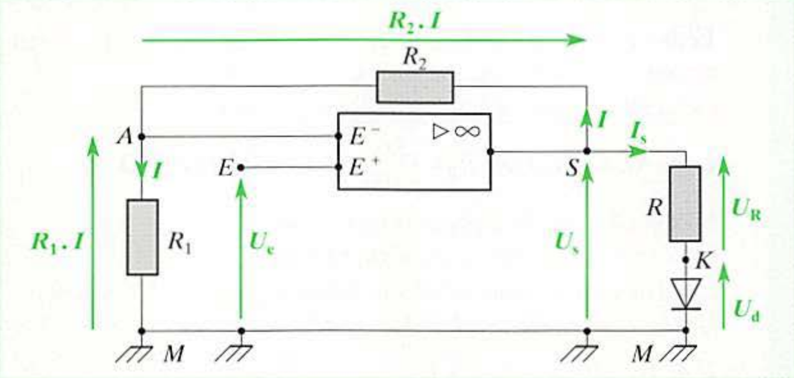
a) $\mathcal{P}_e = U_e \,.\, I_e$, d'où $\mathcal{P}_e = 19{,}0 \times 0{,}100 = \mathbf{1{,}9\ W}$.

b) $\mathcal{P}_s = U_s \,.\, I_s = R_c \,.\, I_s^2$, d'où $\mathcal{P}_s = 33 \times (0{,}100)^2 \approx \mathbf{0{,}3\ W}$.

c) $\eta = \dfrac{\mathcal{P}_s}{\mathcal{P}_e}$, d'où $\eta = \dfrac{330}{1\,900} = \mathbf{0{,}174}$, soit **environ 17 %**.

12.7 1° L'A.O. considéré comme idéal fonctionne en régime linéaire :

$$I^+ = I^- = 0 \quad \text{et} \quad V_E - V_A = \varepsilon = 0.$$



a) $U_{EM} = U_e$ et $U_{EA} = \varepsilon = 0$; alors $U_{AM} = U_e = R_1 \,.\, I$ (*cf.* figure).

$U_s = U_{SM} = U_{SA} + U_{AM} = (R_1 + R_2) \,.\, I = \dfrac{R_1 + R_2}{R_1} \,.\, U_e$,

d'où $U_s = \dfrac{R_1 + R_2}{R_1} \,.\, U_e$, soit $\mathbf{U_s = \mathcal{A}_v \,.\, U_e}$, **avec** $\mathbf{\mathcal{A}_v > 0}$.

Le montage est un amplificateur non inverseur, avec $\mathcal{A}_v = (R_1 + R_2) / R_1$.

b) Calculons le coefficient d'amplification en tension :

avec $R_1 = 2{,}2\ \text{k}\Omega$ et $R_2 = 47\ \text{k}\Omega$, $\mathcal{A}_v = 1 + \dfrac{47}{2{,}2} \approx 22{,}36$,

soit $\mathcal{A}_v \approx \mathbf{22{,}4}$.

2° *a*) $U_s = \mathcal{A}_v \,.\, U_e$, d'où $U_s = 0{,}170 \times 22{,}4 = 3{,}808$, soit $\boldsymbol{U_s \approx 3{,}8\ \text{V}}$.

b) La loi d'additivité des tensions donne :

$U_{SM} = U_{SK} + U_{KM}$, soit $U_s = U_R + U_d$;

$U_R = R \,.\, I_s$, donc $I_s = \dfrac{U_R}{R} = \dfrac{U_s - U_d}{R}$, d'où $I_s = \dfrac{3{,}8 - 2{,}1}{82} \approx 0{,}020\,7$,

soit $\boldsymbol{I_s \approx 0{,}021\ \text{A}}$, ou **environ 21 mA**.

3° *a*) La puissance électrique injectée à l'entrée est :

$\mathcal{P}_e = U_e \,.\, I_e = E \,.\, I^+$, d'où $\mathcal{P}_e \approx 0{,}170 \times 20 \,.\, 10^{-9} = \mathbf{3{,}4 \,.\, 10^{-9}\ W}$.

b) La puissance électrique recueillie en sortie est :

$\mathcal{P}_s = U_s \,.\, I_s$, d'où $\mathcal{P}_s = 3{,}81 \times 0{,}020\,7 \approx 7{,}887 \,.\, 10^{-2}\ \text{W}$,

soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_s \approx 79 \,.\, 10^{-3}\ \text{W}}$, ou **79 mW**.

c) Le facteur d'amplification en puissance est :

$\mathcal{A}_P = \dfrac{\mathcal{P}_s}{\mathcal{P}_e}$, d'où $\mathcal{A}_P = \dfrac{79 \,.\, 10^{-3}}{3{,}4 \,.\, 10^{-9}} \approx 2{,}32 \,.\, 10^7$, soit **environ** $\mathbf{23 \,.\, 10^6}$.

4° *a*) Les alimentations E_1 et E_2 fournissent une puissance électrique au montage :

$\mathcal{P}_{\text{alim}} = E_1 \,.\, I_1 + E_2 \,.\, I_2$, d'où $\mathcal{P}_{\text{alim}} = 14{,}7 \times (22{,}00 + 1{,}19) \,.\, 10^{-3} \approx 0{,}340\,9$,

soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{\text{alim}} = 0{,}341\ \text{W}}$, ou **341 mW**.

b) Le rendement du dispositif est $\eta = \dfrac{\mathcal{P}_s}{\mathcal{P}_{\text{alim}}}$, puisqu'on peut négliger $\mathcal{P}_e$ devant $\mathcal{P}_{\text{alim}}$.

Donc $\eta = \dfrac{79}{341} \approx \mathbf{0{,}232}$, soit **environ 23 %**.

Le montage est un bon amplificateur, mais présente un mauvais rendement énergétique.

5° *a*) Le courant qui circule dans les résistances R_1 et R_2 est $I = \dfrac{U_e}{R_1}$ (*cf.* figure). La puissance $\mathcal{P}_J$ dissipée par effet joule dans ces résistances est :

$\mathcal{P}_J = R_1 \,.\, I^2 + R_2 \,.\, I^2$, donc $\mathcal{P}_J = (R_1 + R_2)\left(\dfrac{U_e}{R_1}\right)^2$, d'où $\mathcal{P}_J = (2{,}2 + 47)\,.\,10^3 \times \left(\dfrac{0{,}170}{2{,}2\,.\,10^3}\right)^2 = 2{,}94\,.\,10^{-4}$,

soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_J \approx 0{,}3\,.\,10^{-3}\,\mathrm{W}}$ **ou 0,3 mW**.

b) Le bilan de puissance du montage est :

$\mathcal{P}_{\mathrm{alim}} + \mathcal{P}_{\mathrm{e}} = \mathcal{P}_{\mathrm{s}} + \mathcal{P}_{\mathrm{J}} + \mathcal{P}_{\mathrm{AO}}$;

$\mathcal{P}_{\mathrm{AO}} = \mathcal{P}_{\mathrm{alim}} + \mathcal{P}_{\mathrm{e}} - (\mathcal{P}_{\mathrm{s}} + \mathcal{P}_{\mathrm{J}}) \approx \mathcal{P}_{\mathrm{alim}} - \mathcal{P}_{\mathrm{s}}$ (car $\mathcal{P}_{\mathrm{e}}$ et $\mathcal{P}_{\mathrm{J}}$ sont inférieures à 1 mW),

d'où $\mathcal{P}_{\mathrm{AO}} \approx 341 - 79 = \mathbf{262\ mW}$.

12.8 1° L'A.O., considéré comme idéal, fonctionne en régime linéaire :

$$I^- = I^+ = 0 \quad \text{et} \quad V_P - V_B = \varepsilon = 0\,.$$

a) Comme $V_B = V_P$, alors $V_B - V_N = V_P - V_N$.

Comme $I^+ = 0$, $V_P - V_N = E$, avec E force électromotrice de la pile.

$V_B - V_N = E > 0$, donc $V_B > V_N$: le courant I_0 va de B vers N.

R_0 est une résistance :

$V_B - V_N = R_0\,.\,I_0$, donc $I_0 = \dfrac{V_B - V_N}{R_0}$, soit $I_0 = \dfrac{E}{R_0}$.

b) La loi des nœuds appliquée en B donne $I_s = I_0 + I^-$.

Comme $I^- = 0$, $\boldsymbol{I_s = I_0}$.

c) La loi des nœuds appliquée en N donne $I_0 = I_R + I^+$.

Comme $I^+ = 0$, $\boldsymbol{I_R = I_0 = I_s}$.

L'intensité du courant dans la résistance R **ne dépend pas de la valeur de R tant que l'A.O. fonctionne en régime linéaire**.

2° *a*) $I_0 = \dfrac{E}{R_0}$, d'où $I_0 = \dfrac{1{,}5}{1\,500} = 10^{-3}\,\mathrm{A} = \mathbf{1\ mA}$.

b) La puissance fournie par la pile est de l'ordre de $E\,.\,I^+$, d'où :

$\mathcal{P}_{\mathrm{pile}} = 1{,}5 \times 20\,.\,10^{-9} = \boldsymbol{30\,.\,10^{-9}\,\mathrm{W}}$, soit **30 nW**.

Elle est vraiment négligeable.

c) ▪ La puissance recueillie dans R est $\mathcal{P}_{\mathrm{J}_R} = R\,.\,I_R^2 = R\,.\,I_0^2$,

d'où $\mathcal{P}_J = 8{,}2\,.\,10^3 \times (1\,.\,10^{-3})^2 = \boldsymbol{8{,}2\,.\,10^{-3}\,\mathrm{W}}$, soit **8,2 mW**.

▪ La puissance fournie par l'alimentation double de l'A.O. est :

$\mathcal{P}_{\mathrm{alim}} = E_1\,.\,I_1 + E_2\,.\,I_2$,

d'où $\mathcal{P}_{\mathrm{alim}} = 15 \times (2{,}3 + 1{,}3)\,.\,10^{-3}$,

soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{\mathrm{alim}} = 54\,.\,10^{-3}\,\mathrm{W}}$, ou **54 mW**.

- Le rendement du dispositif est $\eta = \dfrac{\mathcal{P}_{J_R}}{\mathcal{P}_{\text{alim}}}$,

d'où $\eta = \dfrac{8{,}2}{54} \approx \mathbf{0{,}152}$, soit **environ 15 %**.

Remarque : la puissance dissipée dans l'A.O. est : $\mathcal{P}_{\text{AO}} = \mathcal{P}_{\text{alim}} - \mathcal{P}_{J_R} - \mathcal{P}_{J_{R_0}}$, d'où $\mathcal{P}_{\text{AO}} = 54 - 8{,}2 - 1{,}5 = 44{,}3$ mW, c'est-à-dire 82 % de la puissance fournie par l'alimentation double de l'A.O. Le dispositif est un très bon générateur de courant, mais présente un mauvais rendement énergétique.

13

PRODUCTION ET TRANSPORT DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

RÉSUMÉ DU COURS

Les alternateurs

■ Un alternateur est un convertisseur d'énergie mécanique en énergie électrique : il délivre une tension alternative.

Les alternateurs industriels comportent :

- un **rotor**, pièce tournante, comprenant des électroaimants ;
- un **stator** comprenant des bobines fixes aux bornes desquelles on recueille une tension alternative.

Si p est le nombre de paires de pôles, n la vitesse de rotation, la fréquence f du courant alternatif est :

$$\boxed{f = p \, . \, n}$$

Unités : f est en hertz (Hz) et n en tour par seconde ($\text{tr} \, . \, \text{s}^{-1}$).

■ Un alternateur monophasé, débitant dans une installation industrielle un courant d'intensité efficace I sous une tension de valeur efficace U, est caractérisé par :

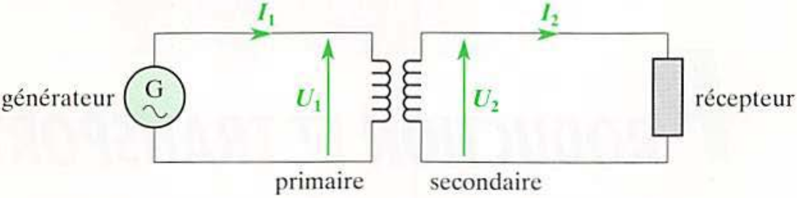
- sa **puissance apparente** $\mathcal{P}_S = U \, . \, I$, exprimée en volt-ampère (V. A) ;

- la puissance électrique moyenne qu'il fournit, $\mathcal{P}_E = U \cdot I \cdot \cos\varphi$ (en watt) ; $\cos\varphi$ est le facteur de puissance qui dépend de l'installation industrielle utilisatrice.

- **son rendement** $\eta = \dfrac{\mathcal{P}_E}{\mathcal{P}_M}$, $\mathcal{P}_M$ étant la puissance mécanique reçue par l'alternateur.

Les transformateurs

■ Un transformateur modifie l'amplitude d'une tension sinusoïdale, et par conséquent sa valeur efficace sans modifier la fréquence.



■ Un transformateur monophasé est caractérisé par :

- Le **primaire** : il comporte une bobine de n_1 spires dont les extrémités sont reliées aux deux bornes d'entrée du transformateur. Aux bornes de cette bobine on applique une tension de valeur efficace U_1 ; la valeur efficace de l'intensité qui circule dans cette bobine est I_1.

- Le **secondaire** : il est constitué par une bobine de n_2 spires dont les extrémités sont reliées aux bornes de sortie du transformateur. Les valeurs efficaces de la tension de sortie et de l'intensité débitée sont respectivement U_2 et I_2.

- Une **carcasse métallique** autour de laquelle sont enroulées les spires du primaire et du secondaire.

- Le **rapport de transformation** $m = \dfrac{n_2}{n_1} = \dfrac{U_{2,0}}{U_1}$, **rapport des tensions** lorsqu'il ne débite aucun courant $(I_2 = 0)$.

- La **puissance nominale** $\mathcal{P}_N = U_{2,0} \cdot I_2$, avec $U_{2,0}$, la tension à vide, et I_2, la valeur efficace de l'intensité lorsqu'il fonctionne dans les conditions prévues par le constructeur.

Lorsqu'il fonctionne dans les conditions proches des valeurs nominales prévues par le constructeur :

$$\boxed{\frac{U_2}{U_1} \approx \frac{I_1}{I_2} \approx m}$$

Le transformateur peut être abaisseur de tension $(m < 1)$ ou élévateur de tension $(m > 1)$.

- Son **rendement** $\eta = \dfrac{\mathcal{P}_2}{\mathcal{P}_1}$ est voisin de 1.

Un transformateur ne fonctionne pas en courant continu.

$\mathcal{P}_1 = U_1 \,.\, I_1 \,.\, \cos \varphi_1$ et $\mathcal{P}_2 = U_2 \,.\, I_2 \,.\, \cos \varphi_2$ sont les puissances électriques délivrées au primaire et au secondaire ; $\cos \varphi_1$ et $\cos \varphi_2$ sont les facteurs de puissance (inférieurs à 1) qui dépendent de l'installation industrielle reliée au transformateur.

Transport de l'électricité

Pour limiter les pertes par effet Joule dans les lignes, on transporte l'électricité sous de très hautes tensions.

Pour des raisons de sécurité, on abaisse ensuite les tensions lors de l'utilisation.

Alternateurs

13.1 Alternateur monophasé

La plaque signalétique d'un alternateur monophasé porte les indications suivantes : 10 kV.A ; 220 V ; 6 pôles ; 50 Hz .

1° Donner les significations de ces indications.

2° Quelle est la valeur efficace de l'intensité du courant délivré par cet alternateur ?

3° Calculer la vitesse de rotation en $\mathrm{tr.min^{-1}}$ de l'arbre de ce générateur.

4° L'alternateur débite dans une installation industrielle de facteur de puissance $\cos\varphi = 0{,}9$.

a) Calculer la puissance électrique fournie par cet alternateur.

b) La puissance mécanique fournie sur l'arbre de cet alternateur est 9,45 kW . Calculer son rendement.

Transformateurs

13.2 Caractéristique d'un transformateur monophasé

Un transformateur 220 V/12 V , abaisseur de tension, a une puissance nominale de 20 V.A .

1° Calculer le rapport de transformation m .

2° Lorsqu'il fonctionne dans les conditions nominales, calculer :

a) la valeur efficace I_2 de l'intensité du courant dans le secondaire ;

b) la valeur efficace I_1 de l'intensité du courant dans le primaire.

3° La fréquence de la tension alternative du primaire est 50 Hz . Quelle est la fréquence de la tension du secondaire ?

4° Peut-il fournir à un récepteur une puissance de 40 W ?

5° Peut-on lui appliquer une tension continue de 220 V ?

13.3 Choix d'un transformateur

Sur une prise de courant marquée « 220 V/5 A » , on branche un transformateur dont le primaire comporte 1 000 spires . Il alimente un poste de soudure.

1° On veut disposer d'une tension de valeur efficace environ égale à 6 V au secondaire.

a) Quel est le nombre de spires au secondaire ?

b) Quelle sera la valeur efficace I_2 de l'intensité qu'il pourra débiter dans les conditions nominales ?

c) Quel doit être l'ordre de grandeur de sa puissance nominale ?

2° On veut maintenant disposer d'une intensité efficace de 40 A au secondaire.

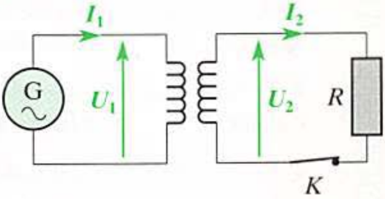
a) Quel sera le nombre de spires au secondaire ?

b) Quelle est la tension au secondaire pour ce fonctionnement ?

c) Calculer l'ordre de grandeur de la puissance nominale de ce transformateur.

13.4 Transformateur dans un circuit

On considère un transformateur monophasé de puissance nominale 15 V.A dont le primaire comporte $n_1 = 1\,000$ spires et le secondaire $n_2 = 500$ spires.



1° L'interrupteur K est ouvert. La tension aux bornes du primaire a une valeur efficace de 24 V délivrée par un générateur alternatif de fréquence 50 Hz.

a) Quelle est la valeur de la tension efficace aux bornes du secondaire ?

b) Quelle est la fréquence de la tension alternative au secondaire ?

2° L'interrupteur K est fermé. Le secondaire est branché sur une résistance $R = 10\ \Omega$ (*cf.* figure ci-dessus). Le transformateur fonctionne nominalement.
Quelles sont les valeurs efficaces I_2 et I_1 ?

3° Le rendement de ce transformateur est $\eta = 96\ \%$.
Calculer la puissance électrique délivrée par le générateur à l'entrée du transformateur.

♦♦ 13.5 Rendement d'un transformateur

Un transformateur monophasé de rapport de transformation $m = 0{,}2$ est alimenté sous une tension alternative de tension efficace 220 V ; sa puissance nominale est 4,4 kV.A.

1° Calculer sa tension $U_{2,0}$ à vide.

2° Calculer l'intensité nominale $I_{2,\mathrm{N}}$ qu'il peut fournir.

3° Il débite, dans un poste de soudure à arc, un courant d'intensité $I_{2,\mathrm{N}}$; la tension U_2 aux bornes du secondaire est alors égale à 38,5 V ; le facteur de puissance au secondaire est $\cos \varphi_2 = 0{,}9$.

a) Calculer la puissance $\mathcal{P}_{\mathrm{E}_2}$ fournie par le transformateur.

b) On évalue les pertes par effet joule dans les bobines du transformateur à 250 W , les pertes dues à la carcasse métallique (pertes dans le fer) à 80 W .

- Sous quelles formes les pertes sont-elles transférées à l'extérieur ?
- Calculer le rendement de ce transformateur.

♦ 13.6 Puissance et rendement pour un transformateur

Un transformateur monophasé abaisse une tension sinusoïdale de valeur efficace $U_1 = 380$ V en une tension sinusoïdale de valeur efficace 220 V . Il alimente, sous une tension de 220 V , un moteur fournissant une puissance utile $\mathcal{P}_{\mathrm{M}} = 1{,}5$ kW . Le moteur a un rendement de 80 % .

1° Le facteur de puissance du secondaire $\cos \varphi_2$ est alors égal à 0,85 . Calculer l'intensité efficace I_2 du courant traversant le moteur.

2° Le rendement de ce transformateur est $\eta = 0{,}92$ % .

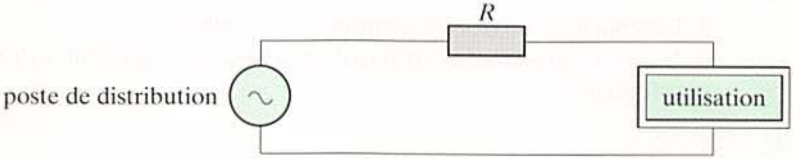
a) Calculer la puissance $\mathcal{P}_{\mathrm{E}_1}$ fournie au primaire.

b) Calculer le rendement de la chaîne transformateur-moteur.

Pertes en ligne

♦ 13.7 Transport de l'énergie électrique

Une ligne de transport d'énergie électrique a une résistance totale $R = 1{,}5\ \Omega$; elle alimente une installation électrique de puissance utile $\mathcal{P}_{\mathrm{u}}$.



La puissance fournie par le poste de distribution est $\mathcal{P}_{\mathrm{E}} = U \cdot I \cdot \cos \varphi$.

1° Calculer :

a) La puissance perdue dans la ligne.

b) La puissance utile disponible aux bornes du récepteur.

c) Le rendement $\mathcal{P}_u / \mathcal{P}_E$ de l'installation.

Données : $U = 220$ V ; $I = 100$ A ; $\cos\varphi = 0{,}9$.

2° Avec $U = 20\,000$ V , $I = 0{,}24$ A , $\cos\varphi = 0{,}9$, répondre aux mêmes questions qu'en **1°**.

3° Quel est l'intérêt du transport sous haute tension ? Comment doit-on alors procéder si le récepteur fonctionne en basse tension (220 V) pour diminuer les pertes en ligne ?

♦ 13.8 Influence du cos φ d'une installation industrielle

Une installation est alimentée en courant alternatif par une ligne de transport E.D.F. comportant deux fils dont la résistance est de 1,5 Ω pour 1 km . La distance entre le poste de distribution de l'E.D.F. et l'habitation est 1 km .

1° Calculer la résistance de la ligne de transport.

2° L'utilisateur branche un radiateur électrique de puissance 2,2 kW .
La tension efficace aux bornes de cet appareil en fonctionnement est alors $U = 228$ V .

a) Calculer l'intensité efficace du courant dans la ligne.

b) Quelle est la puissance électrique perdue par effet joule dans la ligne ?

c) Calculer la puissance électrique fournie par le poste de distribution.

d) Déterminer l'énergie comptabilisée au compteur E.D.F. en 4 h de fonctionnement.

e) Calculer le rapport de l'énergie facturée à l'énergie fournie par la compagnie de distribution.

3° L'utilisateur branche un moteur de 2,2 kW , de facteur de puissance $\cos\varphi = 0{,}6$. La tension efficace de fonctionnement du moteur est 228 V .

a) Répondre aux mêmes questions qu'en **2°**.

b) Pourquoi E.D.F. impose-t-elle aux utilisateurs industriels un facteur de puissance $\cos\varphi$ voisin de 1 ?

13.1 1° La puissance apparente $\mathcal{P}_S$ est égale à 10 kV.A ; la valeur efficace de la tension délivrée est 220 V ; le nombre de paires de pôles est $p = \frac{6}{2} = 3$; la fréquence du courant alternatif débité est 50 Hz.

2° $\mathcal{P}_S = U \cdot I$, donc $I = \frac{\mathcal{P}_S}{U}$,

d'où $I = \frac{10\,000}{220} = 45{,}45$, soit $\boldsymbol{I \approx 45{,}5}$ **A**.

3° $f = p \cdot n$, avec p, le nombre de paires de pôles et n, la vitesse de rotation en tours par seconde.

$n = \frac{f}{p}$, d'où $n = \frac{50}{3} = 16{,}67$ tr . s^{-1}, soit $\boldsymbol{n = 1\,000}$ **tr . min^{-1}**.

4° *a*) $\mathcal{P}_E = \mathcal{P}_S \cdot \cos\varphi$, d'où $\mathcal{P}_E = 10 \cdot 10^3 \times 0{,}9 = 9 \cdot 10^3$ W,
soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_E = 9}$ **kW**.

b) $\eta = \frac{\mathcal{P}_E}{\mathcal{P}_M}$, d'où $\eta = \frac{9}{9{,}45} = 0{,}952$, soit $\boldsymbol{\eta \approx 95}$ **%**.

13.2 1° $m = \frac{U_{2,0}}{U_{1,0}} = \frac{12}{220} = 0{,}054\,5$.

2° *a*) $\mathcal{P}_N = U_{2,0} \cdot I_2$; $I_2 = \frac{\mathcal{P}_N}{U_{2,0}}$.

Pour une tension à vide $U_{2,0} = 12$ V et une puissance nominale $\mathcal{P}_N = 20$ V.A :

$I_2 = \frac{20}{12} = 1{,}666$, soit $\boldsymbol{I_2 \approx 1{,}67}$ **A**.

b) En fonctionnement nominal : $\frac{U_2}{U_1} \approx \frac{I_1}{I_2} \approx m$,

d'où $I_1 = m \cdot I_2 = 0{,}091\,0$, soit $\boldsymbol{I_1 \approx 0{,}09}$ **A**.

3° Un transformateur ne modifie pas la fréquence du courant alternatif ; **la fréquence de la tension au secondaire est donc 50 Hz**.

4° Aux bornes du secondaire, la puissance délivrée est :
$\mathcal{P}_E = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos\varphi$, avec $\cos\varphi < 1$.
Or $U_2 \cdot I_2 \approx \mathcal{P}_N$, pratiquement ; donc $\mathcal{P}_E$ en régime nominal ne peut être qu'inférieure à 20 W.

Il serait dangereux de lui faire fournir une puissance de 40 W, en l'alimentant avec une tension supérieure à 220 V.

5° Non : un transformateur ne fonctionne pas en courant continu. On risque même de le détruire, car la bobine au primaire ne supporterait pas le courant circulant dans ces conditions.

13.3 **1°** *a*) Le rapport de transformation est défini par :

$$m=\frac{U_{2,0}}{U_1}=\frac{n_2}{n_1}, \text{ donc } n_2=n_1 . m .$$

Pour $U_1=220\text{ V}$ et $U_{2,0}=6\text{ V}$,

$$m=\frac{6}{220}, \text{ d'où } n_2=\frac{1\,000\times 6}{220}=27{,}27,$$

soit $\boldsymbol{n_2\approx 27}$ **spires**.

b) Au primaire, I_1 ne doit pas dépasser 5 A ; or, dans les conditions nominales :

$$m=\frac{I_1}{I_2}=\frac{n_2}{n_1}, \text{ donc } I_2=\frac{I_1}{m},$$

$$\text{d'où } I_2=\frac{5\times 220}{6}=183{,}3, \text{ soit } \boldsymbol{I_2\approx 183\text{ A}}.$$

c) $\mathcal{P}_{\text{N}}=U_{2,0}.I_2$, avec $U_{2,0}=6\text{ V}$; $I_2\,(\text{maximale})=183{,}3\text{ A}$.

Donc $\mathcal{P}_{\text{N}}=6\times 183=1\,098$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{\text{N}}\approx 1{,}1\text{ kV.A}}$.

2° *a*) $\dfrac{I_1}{I_2}=m=\dfrac{n_2}{n_1}$,

$$\text{donc } n_2=n_1 . \frac{I_1}{I_2}, \text{ d'où } n_2=\frac{1\,000\times 5}{40}=125,$$

soit $\boldsymbol{n_2=125}$ **spires** pour être dans les conditions nominales.

b) $\dfrac{U_2}{U_1}=\dfrac{I_1}{I_2}=m$ en fonctionnement nominal.

$$U_2=\frac{220\times 5}{40}=27{,}5, \text{ soit } \boldsymbol{U_2=27{,}5\text{ V}}.$$

c) $\mathcal{P}_{\text{N}}=U_{2,0}.I_2$, avec $U_2\approx U_{2,0}$, d'où $\mathcal{P}_{\text{N}}=27{,}5\times 40=\mathbf{1{,}1\text{ kV.A}}$.

13.4 **1°** K est ouvert, donc $I_2=0$. Le transformateur fonctionne à vide.

a) $\dfrac{U_{2,0}}{U_1}=\dfrac{n_2}{n_1}=m$; or $m=\dfrac{500}{1\,000}=0{,}5$, donc $U_{2,0} = 24 \times 0{,}5 = 12$, soit $\mathbf{U_{2,0} = 12\ V}$.

b) La fréquence de la tension au secondaire est égale à celle de la tension au primaire, c'est-à-dire **50 Hz**.

2° $\mathcal{P}_N = U_{2,0} \cdot I_2$, avec I_2 la valeur efficace de l'intensité lorsqu'il fonctionne nominalement.

$I_2 = \dfrac{15}{12} = 1{,}25$, soit $\mathbf{I_2 = 1{,}25\ A}$.

$\dfrac{I_1}{I_2} \approx m$, donc $I_1 = 1{,}25 \times 0{,}5 = 0{,}625$ A. $\mathbf{I_1 = 0{,}625\ A}$.

Par ailleurs, aux bornes de la résistance :

$U_2 = R \cdot I_2$, donc $U_2 = 10 \times 1{,}25 = 12{,}5$, soit $\mathbf{U_2 = 12{,}5\ V}$.

3° La puissance délivrée par le transformateur est $\mathcal{P}_{E_2} = R \cdot I_2^2$,
d'où $\mathcal{P}_{E_2} = 10 \times (1{,}25)^2 = 15{,}62$ W, soit $\mathbf{\mathcal{P}_{E_2} \approx 15{,}6\ W}$.

Le rendement du transformateur est défini par $\eta = \dfrac{\mathcal{P}_{E_2}}{\mathcal{P}_{E_1}}$,

d'où $\mathcal{P}_{E_1} = \dfrac{15{,}6}{0{,}96} = 16{,}25$,
soit $\mathbf{\mathcal{P}_{E_1} = 16{,}25\ W}$.

13.5 **1°** $m = \dfrac{U_{2,0}}{U_1}$, avec $U_1 = 220$ V ;
d'où $U_{2,0} = 0{,}2 \times 220 = 44$, soit $\mathbf{U_{2,0} = 44\ V}$.

2° $\mathcal{P}_N = U_{2,0} \cdot I_{2,N}$, d'où $I_{2,N} = \dfrac{\mathcal{P}_N}{U_{2,0}} = \dfrac{4\,400}{44} = 100$,
soit $\mathbf{I_{2,N} = 100\ A}$.

3° *a*) $\mathcal{P}_{E_2} = U_2 \cdot I_{2,N} \cdot \cos\varphi_2$, d'où $\mathcal{P}_{E_2} = 38{,}5 \times 100 \times 0{,}9 = 3\,465$,
soit $\mathbf{\mathcal{P}_{E_2} = 3\,465\ W}$.

b) Les pertes par effet Joule et les pertes dans le fer sont transférées à l'extérieur sous forme de chaleur :

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_{E_2}}{\mathcal{P}_{E_1}}.$$

Or, d'après le principe de conservation de l'énergie :

$$\mathcal{P}_{E_1} = \mathcal{P}_{E_2} + \mathcal{P}_J + \mathcal{P}_{fer},$$

donc $\eta = \dfrac{3\,465}{3\,465 + 250 + 80} = 0{,}913$, soit $\mathbf{\eta \approx 91\ \%}$.

13.6 1° La puissance $\mathcal{P}_{E_2}$ fournie par le secondaire du transformateur est :

$\mathcal{P}_{E_2} = \dfrac{\mathcal{P}_M}{\eta_{mot}} = \dfrac{1\,500}{0,8} = 1\,875$ W ;

or $\mathcal{P}_{E_2} = U_2 \,.\, I_2 \,.\, \cos\varphi_2$.

Avec $U_2 = 220$ V , tension de fonctionnement du moteur, il vient :

$I_2 = \dfrac{1\,875}{220 \times 0,85} = 10,03$, soit $\boldsymbol{I_2 \approx 10,0}$ **A** .

2° *a*) $\eta = \dfrac{\mathcal{P}_{E_2}}{\mathcal{P}_{E_1}}$, donc $\mathcal{P}_{E_1} = \dfrac{1\,875}{0,92} = 2\,038$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{E_1} \approx 2040}$ **W** .

b) $\eta_{ch} = \eta_{transf} \cdot \eta_{mot}$,

d'où $\eta_{ch} = 0,92 \times 0,8 = 0,736$, soit $\boldsymbol{\eta_{ch} = 73,6}$ **%** .

13.7 1° *a*) La puissance est perdue en ligne par effet joule :

$\mathcal{P}_J = R \,.\, I^2 = 1,5 \times (100)^2 = 15\,000$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_J = 15}$ **kW** .

b) $\mathcal{P}_u = \mathcal{P}_E - \mathcal{P}_J$; or $\mathcal{P}_E = 220 \times 0,9 \times 100 = 19\,800$ W $= 19,8$ kW .

Donc $\mathcal{P}_u = 19,8 - 15 = 4,8$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_u = 4,8}$ **kW** .

c) $\eta = \dfrac{4,8}{19,8} = 0,242$, soit $\boldsymbol{\eta = 24,2}$ **%** .

2° $\boldsymbol{\mathcal{P}_J = 0,0864}$ **W** ; $\boldsymbol{\mathcal{P}_E = 4\,320}$ **W** ;

$\mathcal{P}_u = 4\,320 - 0,086 \approx 4\,320$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_u \approx 4,3}$ **kW** .

3° Le rendement de l'installation, $\eta = \dfrac{\mathcal{P}_u}{\mathcal{P}_E}$, est pratiquement égal à 1 pour une même puissance d'utilisation lorsqu'on transporte l'énergie en haute tension. Si le récepteur fonctionne en basse tension, il faudra utiliser un transformateur abaisseur de tension en bout de ligne.

13.8 1° La ligne étant bifilaire, la longueur L du fil sera le double de la distance du transport :

$L = 2d = 1 \times 2$, soit $L = 2$ km .

La résistance totale de la ligne vaut donc :

$R_L = 2 \times 1,5 = 3$, soit $R_L = 3\ \Omega$.

2° *a*) La puissance électrique consommée par un appareil est :

$$\mathcal{P} = U \,.\, I \,.\, \cos\varphi \,.$$

Un radiateur électrique étant purement résistif, son facteur de puissance est tel que $\cos\varphi = 1$.

$I = \dfrac{\mathcal{P}}{U\,.\cos\varphi} = \dfrac{2{,}2\,.\,10^3}{228} = 9{,}649$, soit $\boldsymbol{I \approx 9{,}65\ \mathrm{A}}$.

b) La puissance perdue par effet joule dans la ligne est :

$\mathcal{P}_\mathrm{J} = R_L\,.\,I^2 = 3 \times 9{,}65^2 = 279{,}37$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_{\mathrm{J},\,L} \approx 279\ \mathrm{J}}$.

c) La puissance électrique fournie est la somme de la puissance consommée par l'appareil et de la puissance perdue en ligne :

$\mathcal{P}_\mathrm{E} = \mathcal{P} + \mathcal{P}_\mathrm{J} = 2\,200 + 279 = 2\,479$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_\mathrm{E} = 2{,}48\ \mathrm{kW}}$.

d) L'énergie comptabilisée au compteur E.D.F. est celle correspondant à la puissance de l'appareil, c'est-à-dire :

$W = \mathcal{P}\,.\,\Delta t = 2{,}2\,.\,10^3 \times 4 = 8{,}8\,.\,10^3$, soit $\boldsymbol{W = 8{,}8\ \mathrm{kWh}}$.

e) Le rapport r de l'énergie facturée W à l'énergie fournie $W_{\mathrm{E_f}}$ est :

$r = \dfrac{W}{W_{\mathrm{E_f}}} = \dfrac{\mathcal{P}}{\mathcal{P}_{\mathrm{E_f}}} = \dfrac{2{,}2\,.\,10^3}{2{,}48\,.\,10^{-3}} = 0{,}887$, soit $\boldsymbol{r \approx 89\ \%}$.

3° *a*) $\mathcal{P} = U\,.\,I\,.\cos\varphi$, d'où $I = \dfrac{\mathcal{P}}{U\,.\cos\varphi} = \dfrac{2\,200}{228 \times 0{,}6} = 16{,}08$,

soit $\boldsymbol{I \approx 16{,}1\ \mathrm{A}}$.

$\mathcal{P}_\mathrm{J} = R_L\,.\,I^2 = 3 \times 16{,}1^2 = 777{,}63$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_\mathrm{J} \approx 778\ \mathrm{W}}$.

$\mathcal{P}_\mathrm{E} = \mathcal{P} + \mathcal{P}_\mathrm{J} = 2\,200 + 778 = 2\,978$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}_\mathrm{E} \approx 2{,}98\ \mathrm{kW}}$.

$W = \mathcal{P}\,.\,\Delta t = 2{,}2\,.\,10^3 \times 4 = 8{,}8\,.\,10^3$, soit $\boldsymbol{W \approx 8{,}8\ \mathrm{kWh}}$.

$r = \dfrac{W}{W_\mathrm{E}} = \dfrac{\mathcal{P}}{\mathcal{P}_\mathrm{E}} = \dfrac{2{,}2\,.\,10^3}{2{,}98\,.\,10^3} = 0{,}738$, soit $\boldsymbol{r \approx 74\ \%}$.

Lorsque le facteur de puissance décroît, la perte en ligne augmente.

b) E.D.F. impose aux utilisateurs industriels un facteur de puissance voisin de 1 pour améliorer le rendement de la distribution en réduisant les pertes en ligne.

14

RADIOACTIVITÉ - ÉNERGIE NUCLÉAIRE

RÉSUMÉ DU COURS

■ **Noyau atomique, nucléide :** les nucléons sont les particules constituant le noyau d'un atome ; ce sont des protons ou des neutrons.

Le noyau d'un atome comporte :

- A nucléons : **A est le nombre de masse** ;
- Z protons : **Z est le numéro atomique** (nombre de charge) ;
- $(A-Z)$ neutrons.

L'atome comporte Z électrons.

Un **nucléide** est un ensemble d'atomes ou d'ions possédant des noyaux identiques. Il est caractérisé par les nombres A et Z.

Un **élément** est constitué par les nucléides de même numéro atomique. À chaque valeur de Z, correspond le symbole d'un élément (*cf.* classification périodique).

Un nucléide sera noté : ${}_{Z}^{A}\mathrm{X}$, X étant le symbole de l'élément.

Les noyaux des **isotopes** diffèrent par le nombre de neutrons, mais possèdent le même numéro atomique Z.

■ **Radioactivité :** la radioactivité résulte de désintégrations spontanées de noyaux atomiques instables. Le noyau est modifié : il y a émission de différentes particules et formation d'un noyau-fils. Généralement dans un état excité, ce noyau-fils émet alors un **rayonnement électromagnétique appelé γ** .

Il existe trois types de désintégrations spontanées, dont les équations-bilans s'écrivent :

- **radioactivité α**, émission d'un noyau d'hélium :

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He + \gamma ; $$

- **radioactivité β^-**, émission d'un électron (symbole : ${}^{0}_{-1}e$) :

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e + \gamma + \overline{\nu} ; $$

- **radioactivité β^+**, émission d'un positon (symbole : ${}^{0}_{1}e$) :

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{1}e + \gamma + \nu ; $$

ν et $\overline{\nu}$ sont des antiparticules appelées neutrino et antineutrino, très difficiles à détecter ; elles ont une masse quasi nulle. Électron et positon sont deux antiparticules de même masse, mais de charges opposées.

Les équations de ces désintégrations doivent respecter :

- **la conservation du nombre de masse** ;
- **la conservation du nombre de charge**.

■ **Activité et période :** l'activité A d'un échantillon mesure le nombre moyen de désintégrations détectées par unité de temps.

L'activité se mesure en **becquerel (Bq)** : 1 Bq = 1 désintégration par seconde.

La **période radioactive** (ou demi-vie) est la durée au bout de laquelle l'activité d'un nucléide est divisée par deux.

Au bout de n périodes, un échantillon d'activité initiale A_0 possède une activité :

$$ \boxed{A = \frac{A_0}{2^n}} $$

L'activité A est proportionnelle au nombre de noyaux N non désintégrés, et proportionnelle à l'inverse de la période :

$$ \boxed{A = k \cdot \frac{N}{T}} $$

Les activités dues aux radionucléides contenus dans un échantillon s'ajoutent.

■ **Unités :** on utilise comme unité de masse, l'unité de masse atomique (symbole : u) ; c'est le douzième de la masse d'un atome de carbone 12.

$$ 1\ \text{u} = \frac{1\ \text{kg}}{N_A} = 1,660\,5 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} $$; N_A représente la constante d'Avogadro.

Comme unité d'énergie, on utilise l'électron-volt (eV) ou le méga électron-volt (MeV).

$$ 1\ \text{eV} = 1,602\,2 \cdot 10^{-19}\ \text{J} \ ; \ 1\ \text{MeV} = 1,602\,2 \cdot 10^{-13}\ \text{J}. $$

	proton	**neutron**	**électron**	$^{4}_{2}\mathrm{He}$
masse	1,007 3 u	1,008 7 u	$0{,}55 \cdot 10^{-3}$ u	4,001 5 u

■ **Énergie libérée par une réaction nucléaire :** lors de certaines réactions nucléaires, de l'énergie est libérée sous forme :

- d'énergie cinétique communiquée aux particules créées ;
- d'énergie de rayonnement γ, rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde.

On appelle **perte de masse** dans une réaction nucléaire, la différence entre la masse totale des noyaux, pris au repos et séparés avant la réaction, et la masse totale des noyaux (séparés et au repos) après la réaction.

Elle est à l'origine de l'énergie nucléaire libérée, $\mathscr{E}$; d'après la relation d'Einstein :

$$\boxed{\mathscr{E} = (m_{\text{avant}} - m_{\text{après}}) \cdot c^2}$$

Unités :
l'énergie libérée $\mathscr{E}$ est en joule (J) ; la perte de masse $(m_{\text{avant}} - m_{\text{après}})$ est en kilogramme (kg) ; $c = 3 \cdot 10^8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ est la vitesse de la lumière dans le vide en mètre par seconde ($\mathrm{m \cdot s^{-1}}$).

À une perte de masse égale à l'unité de masse atomique, il correspond une énergie libérée de 931,5 MeV.

■ **Énergie de liaison $\mathscr{E}_\ell$ d'un noyau correspondant au nucléide X de masse m_X :** c'est l'énergie libérée lors de la formation du noyau à partir des nucléons séparés au repos :

$$\boxed{\mathscr{E}_\ell = [Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n] \cdot c^2 - m_X \cdot c^2}$$

où m_p est la masse du proton, m_n la masse du neutron et m_X la masse du noyau X.

On définit l'énergie de liaison moyenne par nucléon : $\dfrac{\mathscr{E}_\ell}{A}$.

■ **La fission** est une réaction nucléaire provoquée, consistant en la fragmentation d'un noyau lourd (noyau fissile) sous l'impact d'un neutron d'énergie convenable ; elle fournit l'énergie dans les réacteurs nucléaires des centrales nucléaires à uranium. Les noyaux fissiles sont ceux de l'uranium 235.

■ **La fusion** est une réaction nucléaire provoquée, au cours de laquelle deux noyaux légers s'unissent pour former un noyau plus lourd. L'énergie libérée par la perte de masse correspondante est à l'origine du rayonnement des étoiles, et donc du Soleil.

DES EXERCICES ■

Pour résoudre ces exercices, il sera nécessaire d'utiliser certaines données du résumé.

Structure d'un noyau d'iode

14.1 L'atome d'iode naturel (symbole : I) comporte 53 électrons ; le nombre de masse du noyau est 127 .

1° Donner la composition du noyau et écrire le symbole du nucléide correspondant.

2° On fabrique des isotopes artificiels de l'iode, par exemple l'iode 131 utilisé en médecine. Donner la composition du noyau de ce nucléide.

Radioactivité spontanée

14.2 Radioactivités α et β

Soient trois noyaux émetteurs et leurs noyaux-fils :

$$\left|{}^{238}_{94}\mathrm{Pu}\ ,\ {}^{234}_{92}\mathrm{U}\right|;\ \left|{}^{135}_{55}\mathrm{Cs}\ ,\ {}^{135}_{56}\mathrm{Ba}\right|;\ \left|{}^{13}_{7}\mathrm{N}\ ,\ {}^{13}_{6}\mathrm{C}\right|.$$

Ils correspondent à trois types de désintégrations α , β^- ou β^+ qui s'accompagnent d'émission γ.
Pour chaque noyau émetteur :

1° Retrouver l'équation-bilan de la désintégration en précisant le type de radioactivité et les particules émises.

2° Donner la condition pour qu'il y ait émission d'un rayonnement γ.

14.3 Activité et période

Un échantillon contient du césium radioactif ${}^{137}_{55}\mathrm{Cs}$. En juin 1994, son activité est $A_0 = 1{,}85 \cdot 10^5$ Bq , sa période est de 30 ans.

1° En quelle année son activité sera-t-elle divisée par 2 ?

2° En juin 2114, quelle sera le nombre moyen de désintégrations par seconde que subira cet échantillon ?

♦ 14.4 Radioactivité α

L'américium ${}^{241}_{95}\mathrm{Am}$ est émetteur α ; son noyau-fils est le neptunium (symbole de l'élément Np).

1° Sa demi-vie est égale à 433 ans. Calculer au bout de combien d'années l'activité d'un échantillon est réduite au quart de sa valeur initiale.

2° Écrire l'équation-bilan de la réaction.

3° Calculer la perte de masse au cours de cette désintégration nucléaire.
Données : les masses des noyaux sont :

$$^{241}_{95}\text{Am} = 241{,}056\,8 \text{ u} \quad \text{et} \quad ^{237}_{93}\text{Np} = 237{,}048\,2 \text{ u} \;;$$

les autres données sont dans le résumé du cours.

4° Calculer, en MeV puis en joule, l'énergie libérée au cours de cette désintégration.

5° Sous quelles formes apparaît l'énergie libérée ?

♦ 14.5 Radioactivité β^-

Le noyau de cobalt $^{60}_{27}\text{Co}$ est émetteur β^- ; le noyau-fils est un noyau de nickel (Ni).

1° Écrire l'équation-bilan de la réaction.

2° Calculer, en joule puis en MeV, l'énergie libérée lors de cette désintégration.
Données : masse des noyaux : Co = 59,933 8 u ; Ni = 59,931 2 u.

3° Lors de cette réaction, on a détecté des électrons ayant une énergie cinétique de 0,6 MeV.

a) En admettant que $\mathscr{E}_\text{K} = \frac{1}{2} m \,.\, v^2$, quelle serait la vitesse de l'un de ces électrons ? ($m = 9{,}1 \,.\, 10^{-31}$ kg.)
La vitesse d'un électron ne peut pas dépasser la vitesse de la lumière dans le vide. Que pensez-vous du résultat trouvé ?

b) Sous quelles autres formes d'énergie, l'énergie libérée est-elle apparue ?

♦ 14.6 Radioactivité β^+

1° Quelle est la constitution de l'atome de sodium $^{22}_{11}\text{Na}$?

2° Le nucléide $^{22}_{11}\text{Na}$ est radioactif β^+. Écrire la réaction nucléaire correspondante et préciser le nom du nucléide $^{A}_{Z}\text{X}$ obtenu. (*Cf.* classification périodique, p. 351.)

3° Des mesures précises donnent :
$^{22}\text{Na} = 21{,}994\,4$ u ; X = 21,991 4 u ; positon = $0{,}55 \,.\, 10^{-3}$ u.

Calculer, en joule, l'énergie libérée lors de cette désintégration par chaque noyau.

4° Un échantillon de matière contient du sodium 22 radioactif. Son activité est : $A = 1{,}78 \cdot 10^{14}$ Bq . Si on admet que l'énergie transférée à l'extérieur sous forme de chaleur représente 90 % de l'énergie libérée, quelle est la quantité de chaleur transférée chaque seconde ?

♦♦ 14.7 Activité globale d'un échantillon

Après la catastrophe de Tchernobyl en 1986, on a prélevé un échantillon contenant divers radioéléments. On a mesuré les activités de ces radioéléments.

nucléide	$^{137}\mathrm{Cs}$	$^{106}\mathrm{Ru}$	$^{144}\mathrm{Ce}$
activité (Bq)	55 000	76 000	290 000
période	30 ans	1 an	0,8 an

1° Calculer l'activité globale de cet échantillon au moment de la mesure.

2° Quelle sera l'activité de chaque radioélément de cet échantillon en 1996 ? En déduire l'activité globale au bout de cette période.
On utilisera la touche X^Y sur la machine à calcul pour calculer 2^n, n étant le nombre de périodes correspondant à la durée de 10 ans.

14.8 Datation par le carbone 14

Lorsque, dans la haute atmosphère, un neutron appartenant au rayonnement cosmique rencontre un noyau d'azote $^{14}_{7}\mathrm{N}$, il donne naissance à du carbone 14, isotope du carbone $^{12}_{6}\mathrm{C}$.

1° Écrire l'équation-bilan de la réaction en précisant la nature de la particule apparue avec le carbone 14.

2° Le noyau de carbone 14 se désintègre en émettant un rayonnement β^-. Écrire le bilan de cette réaction.

3° Des végétaux absorbent le dioxyde de carbone de l'atmosphère provenant indifféremment du carbone 14 et du carbone 12. La proportion de ces deux isotopes est la même dans les végétaux vivants et dans l'atmosphère. Mais, lorsque la plante meurt, elle cesse d'absorber le dioxyde de carbone ; le carbone 14 qu'elle contient se désintègre alors, sans être renouvelé, avec une période de $T = 5\,570$ ans.

a) Quelle sera l'activité d'un échantillon de végétal au bout d'une durée $t = n \cdot T$ après sa mort ?

b) On a comparé l'activité A_1 d'un échantillon de bois trouvé dans une tombe égyptienne avec l'activité A_2 d'un spécimen analogue de même bois, mais vivant. Le rapport est $\frac{A_1}{A_2} = 0{,}54$.

Calculer l'ordre de grandeur de l'âge du spécimen trouvé dans la tombe.

Données : $2^{0{,}889} = 1{,}852$.

L'énergie de liaison du polonium 210

♦ **14.9** **1°** Donner la constitution du noyau de l'atome de polonium $^{210}_{84}\mathrm{Po}$.

2° Sa masse est égale à 210,048 2 u ; calculer son énergie de liaison.

3° Calculer l'énergie de liaison par nucléon.

Réactions de fission et de fusion nucléaires

♦♦ 14.10 Énergie libérée lors d'une fission

Parmi les nombreuses réactions qui peuvent avoir lieu dans un réacteur nucléaire, la réaction suivante est observée :

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{x}_{54}\mathrm{Xe} + {}^{95}_{y}\mathrm{Sr} + 2\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}.$$

1° Remplacer, dans l'équation-bilan, x et y par leur valeur.

2° Les énergies de liaison par nucléon sont :

	U	Xe	Sr
$\mathscr{E}_\ell/A$ (en MeV)	7,7	8,4	8,7

a) Donner l'expression de la masse des différents noyaux intervenant dans cette réaction en fonction de la masse m_p du proton, m_n du neutron et des énergies de liaison par nucléon.

b) Montrer que l'énergie libérée lors de cette réaction s'exprime simplement en fonction des énergies de liaison par nucléon.

c) Calculer, en MeV, l'énergie libérée lors de la réaction nucléaire.

3° *a*) En déduire l'énergie libérée par la fission de 1 g d'uranium 235.

b) Combien de litres d'essence faudrait-il brûler pour obtenir la même énergie ?

Donnée : la combustion d'un litre d'essence libère $3{,}5 \cdot 10^7$ J.

14.11 Réaction de fusion

Dans les étoiles, et en particulier dans le Soleil, il se produit de nombreuses réactions nucléaires ; par exemple :

$$^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}\,.$$

Cette réaction pourrait être réalisée dans de futures centrales nucléaires.

1° Pourquoi appelle-t-on cette réaction une réaction de fusion ?

2° On donne les diverses énergies de liaison par nucléon :

	deutérium	tritium	hélium
$\mathscr{E}_\ell/A$ (en MeV)	1,11	2,83	7,1

a) Calculer l'énergie libérée lors de la formation d'un noyau d'hélium à partir des nucléons séparés.

b) Calculer l'énergie libérée lors de la formation d'un noyau de deutérium et d'un noyau de tritium à partir des nucléons séparés.

c) En déduire l'énergie libérée lors de la réaction nucléaire.

3° *a*) Calculer l'énergie libérée lors de la formation d'un gramme d'hélium. *Données :* $m(\mathrm{He}) \approx 4\ \mathrm{g\,.\,mol^{-1}}$; $\mathrm{N_A} = 6{,}02\,.\,10^{23}\ \mathrm{mol^{-1}}$.

b) Combien faudrait-il brûler de litres d'essence pour obtenir la même énergie ? *Donnée :* la combustion d'un litre d'essence libère $3{,}5\,.\,10^{7}\ \mathrm{J}$.

14.1 1° Le numéro atomique Z (ou nombre de charge) est $Z = 53$; il y a donc 53 protons.

Le nombre de masse A, où nombre de nucléons, est égal à 127.

Le nombre de neutrons est donc $N = A - Z = 127 - 53$, soit $\mathbf{N = 74}$.

Symbole du nucléide : $\mathbf{^{127}_{53}I}$.

2° $^{131}_{53}\mathrm{I}$ comporte **53 protons** et **78 neutrons**.

14.2 1° ■ $^{238}_{94}\mathrm{Pu} \rightarrow {}^{234}_{92}\mathrm{U} + {}^{b}_{a}\mathrm{X} + \gamma$.

- Conservation du nombre de protons : $94 = 92 + a$, soit $a = 2$.
- Conservation du nombre de nucléons : $238 = 234 + b$, soit $b = 4$.

L'élément X est donc l'hélium He de numéro atomique 2, d'où l'équation de désintégration :

$$\mathbf{^{238}_{94}Pu \rightarrow {}^{234}_{92}U + {}^{4}_{2}He + \gamma.}$$

Le plutonium 238 est émetteur α.

■ $^{135}_{55}\mathrm{Cs} \rightarrow {}^{135}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{a}_{b}\mathrm{X} + \gamma + ?$

$55 = 56 + b$, donc $b = -1$; $135 = 135 + a$, donc $a = 0$;

$^{a}_{b}\mathrm{X}$ est donc $^{0}_{-1}\mathrm{e}$, symbole de l'électron ; d'où l'équation de désintégration :

$$\mathbf{^{135}_{55}Cs \rightarrow {}^{135}_{56}Ba + {}^{0}_{-1}e + \overline{\nu} + \gamma.}$$

Il s'agit d'une désintégration β^- qui s'accompagne de l'émission d'un antineutrino $\overline{\nu}$.

■ $^{13}_{7}\mathrm{N} \rightarrow {}^{13}_{6}\mathrm{C} + {}^{a}_{b}\mathrm{X} + \gamma + ?$

$13 = 13 + a$, donc $a = 0$; $7 = 6 + b$, donc $b = 1$.

$^{a}_{b}\mathrm{X}$ est donc le positon β^+ de symbole $^{0}_{1}\mathrm{e}$; d'où l'équation de désintégration :

$$\mathbf{^{13}_{7}N \rightarrow {}^{13}_{6}C + {}^{0}_{1}e + \nu + \gamma.}$$

Il s'agit d'une désintégration β^+ qui s'accompagne de l'émission d'un neutrino ν.

2° Pour qu'il y ait émission d'un rayonnement électromagnétique γ, **il faut que le noyau-fils soit produit dans un état énergétique excité**.
En retournant vers son état fondamental, il émet un rayonnement électromagnétique γ de grande énergie.

14.3 **1°** La période est la durée au bout de laquelle l'activité d'un échantillon est divisée par deux. Donc, son activité sera divisée par deux 30 ans plus tard, soit en **juin 2024**.

2° En juin 2114, soit 120 ans après la première mesure d'activité, son activité sera alors égale à :

$$A = \frac{A_0}{2^n},$$

n étant le nombre de périodes contenues dans 120 ans, soit $n = \frac{120}{30} = 4$.

D'où $A = \frac{1{,}85 \,.\, 10^5}{2^4} = 11{,}6 \,.\, 10^3$, soit $\boldsymbol{A \approx 11{,}6 \,.\, 10^3}$ **Bq**.

L'activité d'un échantillon étant le nombre moyen de désintégrations par seconde, en juin 2114, il se produira encore en moyenne $11{,}6 \,.\, 10^3$ désintégrations par seconde.

14.4 **1°** $A = \frac{A_0}{2^n}$, avec $\frac{A}{A_0} = \frac{1}{4}$, d'où $2^n = 4$, soit $n = 2$.

L'activité sera réduite au quart de sa valeur initiale au bout de deux périodes, soit **866 ans**.

2° ${}^{241}_{95}\text{Am} \rightarrow {}^{A}_{Z}\text{Np} + {}^{4}_{2}\text{He} + \gamma$.

- Conservation de la charge : $95 = Z + 2$, $Z = 93$.
- Conservation du nombre de masse : $241 = A + 4$, $A = 237$.

Donc : $$\boldsymbol{{}^{241}_{95}\text{Am} \rightarrow {}^{237}_{93}\text{Np} + {}^{4}_{2}\text{He} + \gamma}.$$

3° Perte de masse $= m_{\text{avant}} - m_{\text{après}}$; on doit utiliser la donnée supplémentaire : $m\left({}^{4}_{2}\text{He}\right) = 4{,}001\,5$ u.

D'où perte de masse $= 241{,}056\,8 - (237{,}048\,2 + 4{,}001\,5)$,

soit **perte de masse = $\boldsymbol{7{,}1 \,.\, 10^{-3}}$ u**.

4° À une perte de masse 1 u correspond une énergie libérée de 931,5 MeV d'après la relation d'Einstein.

Donc $\mathscr{E} = 7{,}1 \,.\, 10^{-3} \times 931{,}5$, soit $\mathscr{E} = \mathbf{6{,}614}$ **MeV**.

Or $1 \text{ MeV} = 1{,}602\,2 \,.\, 10^{-13}$ J, donc $\mathscr{E} = \boldsymbol{1{,}059\,6 \,.\, 10^{-12}}$ **J**.

5° Cette énergie libérée apparaît sous forme d'**énergie cinétique** communiquée au noyau d'hélium essentiellement, le noyau-fils ayant une masse importante devant celle du noyau d'hélium. Il y a aussi de l'énergie rayonnante (rayonnement γ) lors de la désexcitation du noyau-fils.

14.5 1° $^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{A}_{Z}\text{Ni} + {}^{0}_{-1}\text{e} + \gamma + \overline{\nu}$;

$27 = Z - 1$, $Z = 28$; $60 = A + 0$, $A = 60$.

Donc : $$\mathbf{^{60}_{27}Co \rightarrow {}^{60}_{28}Ni + {}^{0}_{-1}e + \overline{\nu} + \gamma}.$$

2° À une perte de masse correspond une libération d'énergie :

$$\mathscr{E} = \text{c}^2 \,.\, \text{perte de masse.}$$

Or perte de masse $= m_{\text{avant}} - m_{\text{après}}$.
On doit utiliser la donnée supplémentaire : $m_{\text{e}} = 0{,}55 \,.\, 10^{-3}$ u.
D'où perte de masse $= 59{,}933\,8 - (59{,}931\,2 + 0{,}55 \,.\, 10^{-3})$ u,
soit perte de masse $= 2{,}05 \,.\, 10^{-3}$ u.
Or $1 \text{ u} = 1{,}660\,5 \,.\, 10^{-27}$ kg, donc perte de masse $= 3{,}404 \,.\, 10^{-30}$ kg.
L'énergie libérée est égale (avec $\text{c} = 3 \,.\, 10^8 \text{ m} \,.\, \text{s}^{-1}$) à :
$\mathscr{E} = 9 \,.\, 10^{16} \times 3{,}404 \,.\, 10^{-30} = \mathbf{3{,}063\,6 \,.\, 10^{-13}\ J}$.
Avec $1 \text{ MeV} = 1{,}602\,2 \,.\, 10^{-13}$ J, on a $\mathscr{E} = 1{,}91$ MeV.

Remarque : le calcul en MeV est plus rapide en remarquant que :

$$1 \text{ u} \leftrightarrow 931{,}5 \text{ MeV} \quad \text{et} \quad 2{,}05 \,.\, 10^{-3} \text{ u} \leftrightarrow 1{,}91 \text{ MeV}.$$

3° *a*) $\frac{1}{2} m \,.\, v^2 = \frac{\mathscr{E}_\text{K}}{m}$, donc $v^2 = \frac{2\,\mathscr{E}_\text{K}}{m}$.

Or $\mathscr{E}_\text{K} = 0{,}6 \times 1{,}602\,2 \,.\, 10^{-13} = 0{,}961\,32 \,.\, 10^{-13}$ J,

d'où $v^2 = \frac{2 \times 9{,}163 \,.\, 10^{-14}}{9{,}1 \,.\, 10^{-31}}$, soit $\boldsymbol{v = 4{,}6 \,.\, 10^8\ \text{m} \,.\, \text{s}^{-1}}$.

La vitesse trouvée est supérieure à la vitesse de la lumière dans le vide. C'est impossible. L'expression utilisée pour exprimer l'énergie cinétique n'est pas correcte. En effet, l'électron animé d'une grande vitesse ne suit plus les mêmes lois qu'en mécanique classique. On dit que cette particule est relativiste.

b) L'énergie apparaît aussi sous forme d'**énergie cinétique** communiquée au noyau-fils, et sous forme d'**énergie rayonnante** γ ; les antineutrinos emportent également une certaine énergie.

14.6 1° Il comporte un noyau comprenant **11 protons** et **11 neutrons** ; le nuage électronique de l'atome comporte 11 électrons.

2° $\mathbf{^{22}_{11}Na \rightarrow {}^{22}_{10}Ne + {}^{0}_{1}e + \nu + \gamma}$. Le nucléide $^{22}_{10}\text{Ne}$ est le **néon**.

3° $\mathscr{E} = \text{c}^2 \,.\,$ perte de masse. Or perte de masse $= m(\text{Na}) - [m(\text{Ne}) + m(\text{e})]$,
d'où perte de masse $= 2{,}45 \,.\, 10^{-3}$ u, donc :

- en MeV, $\mathscr{E} = 2{,}45 \,.\, 10^{-3} \times 931{,}5 = 2{,}282$ MeV ;
- en joule, $\mathscr{E} = 2{,}282 \times 1{,}602\,2 \,.\, 10^{-13} = \mathbf{3{,}656 \,.\, 10^{-13}\ J}$.

4° La quantité de chaleur transférée chaque seconde à l'extérieur est donc :

$Q = A \cdot \mathscr{E} \cdot 0{,}9$, soit $\mathbf{Q = 58{,}6\ J}$,

c'est-à-dire une puissance de 58,6 W.

14.7 1° Les activités des divers constituants d'un échantillon radioactif s'ajoutent :

$$\mathbf{A = 421\,000\ Bq}.$$

2° Dix ans plus tard, si T est la période de chaque élément :

$n = \dfrac{10}{T}$, donc $A = \dfrac{A_0}{2^{\frac{10}{T}}}$.

Applications numériques :

$A(\mathrm{Cs}) = \dfrac{55\,000}{2^{0,33}} = 43\,754\ \mathrm{Bq}$;

$A(\mathrm{Ru}) = \dfrac{76\,000}{2^{10}} = 74{,}2\ \mathrm{Bq}$;

$A(\mathrm{Ce}) = \dfrac{290\,000}{2^{12,5}} = 50{,}1\ \mathrm{Bq}$.

Pratiquement, l'activité est essentiellement due à celle du césium : $A \approx \mathbf{43\,878\ Bq}$.

14.8 1° $\mathbf{{}^{14}_{7}N + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{14}_{6}C + {}^{A}_{Z}X}$, donc $A = 1$ et $Z = 1$.

Cette particule est un proton ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$.

2° $\mathbf{{}^{14}_{6}C \rightarrow {}^{0}_{1}e + {}^{14}_{7}N + \gamma + \nu}$.

3° *a*) $\mathbf{A = \dfrac{A_0}{2^n}}$.

b) $2^n = \dfrac{A_0}{A}$.

On peut admettre que l'activité de l'échantillon lors de sa mise dans la tombe est $A_0 = A_2$ (bois vivant) et, aujourd'hui, $A_1 = A$ bois mort.

D'où $2^n = \dfrac{1}{0{,}54} = 1{,}852$, soit $n = 0{,}889$.

Le bois a été coupé il y a environ $0{,}889T =$ **4 952 années**.

14.9 1° **84 protons ; 126 neutrons**.

2° $\mathscr{E}_\ell = [m_n \times 126 + m_p \times 84] \,.\, c^2 - m(\text{Po}) \,.\, c^2 =$ perte de masse $.\, c^2$,
d'où perte de masse $= [126 \times 1{,}008\,7 + 84 \times 1{,}007\,3] - 210{,}048\,2$,
soit perte de masse $= 1{,}661\,2$ u.

Or $1\,u \leftrightarrow 931{,}5$ MeV, donc $\boldsymbol{\mathscr{E}_\ell = 1\,547{,}41}$ **MeV**.

3° L'énergie de liaison correspondante, par nucléon, vaut alors :

$$\frac{1\,547{,}41}{210} = \mathbf{7{,}369\ MeV/nucléon}.$$

14.10 1° $235 + 1 = x + 95 + 2$, donc $x = 139$;
$92 + 0 = 54 + y + 0$, donc $y = 38$.

$$^{235}_{92}\text{U} + {}^{1}_{0}\text{n} \rightarrow {}^{139}_{54}\text{Xe} + {}^{95}_{38}\text{Sr} + 2\,{}^{1}_{0}\text{n}.$$

2° *a*) $m(\text{Xe}) = 54\,m_p + 85\,m_n - 139\,\mathscr{E}'_\ell(\text{Xe})$, avec $\mathscr{E}'_\ell = \mathscr{E}_\ell / A$.
$m(\text{Sr}) = 38\,m_p + 57\,m_n - 95\,\mathscr{E}'_\ell(\text{Sr})$;
$m(\text{U}) = 92\,m_p + 143\,m_n - 235\,\mathscr{E}'_\ell(\text{U})$.

b) $\mathscr{E} = [m(\text{U}) + m_n - (m(\text{Xe}) + m(\text{Sr}) + 2\,m_n)] \,.\, c^2$,
$\boldsymbol{\mathscr{E} = 95\,\mathscr{E}'_\ell(\text{Sr}) + 139\,\mathscr{E}'_\ell(\text{Xe}) - 235\,\mathscr{E}'_\ell(\text{U})}$.

c) $\boldsymbol{\mathscr{E} = 184{,}6}$ **MeV**.

3° *a*) Un atome d'uranium a une masse environ égale à 235 u.
Donc, dans 1 g, il y a n atomes, avec :

$$n = \frac{1 \,.\, 10^{-3}}{235 \times 1{,}660\,5 \,.\, 10^{-27}} = 2{,}563 \,.\, 10^{21}.$$

L'énergie libérée est alors égale à :
$\mathscr{E} = 2{,}563 \,.\, 10^{21} \times 184{,}6 \times 1{,}602\,2 \,.\, 10^{-13}$, soit $\boldsymbol{\mathscr{E} = 7{,}58 \,.\, 10^{10}}$ **J**.

b) Il faudrait brûler environ **2 166 litres** d'essence pour avoir la même énergie.

14.11 1° C'est une réaction de fusion nucléaire, car, par combinaison de deux noyaux légers, on obtient un noyau de masse plus importante.

2° *a*) L'énergie libérée lors de la formation d'un noyau d'hélium est égale à son énergie de liaison :

$$\mathscr{E}_1 = \mathscr{E}_\ell = 7{,}1 \times 4 = \mathbf{28{,}4\ MeV}.$$

b) L'énergie libérée lors de la formation du deutérium est égale à :

$$2 \times 1{,}11 = \mathbf{2{,}22\ MeV}.$$

L'énergie libérée lors de la formation du tritium est égale à :

$$2{,}83 \times 3 = \mathbf{8{,}49\ MeV}\ .$$

Donc, au total : $\mathscr{E}_2 = 2{,}22 + 8{,}49 = \mathbf{10{,}71\ MeV}$.

c) 5 nucléons séparés $\rightarrow {}_1^2\mathrm{H} + {}_1^3\mathrm{H}\,(\mathscr{E}_2) \rightarrow {}_2^4\mathrm{He} + {}_0^1\mathrm{n}\,(\mathscr{E}_3)$

ou

5 nucléons séparés $\xrightarrow{\qquad\qquad\qquad} {}_2^4\mathrm{He} + {}_0^1\mathrm{n}\,(\mathscr{E}_1)$.

D'après le principe de conservation de l'énergie, on peut écrire :
$\mathscr{E}_1 = \mathscr{E}_3 + \mathscr{E}_2$, d'où $\mathscr{E}_3 = \mathscr{E}_1 - \mathscr{E}_2 = 28{,}4 - 10{,}71$,
soit $\mathbf{\mathscr{E}_3 = 17{,}69\ MeV}$.

3° *a*) À 1 g d'hélium, il correspond n noyaux d'hélium, avec :

$$n = \frac{1}{4} \times 6{,}02 \,.\, 10^{23} = 1{,}505 \,.\, 10^{23}\ .$$

L'énergie libérée est :

$$\mathscr{E} = 1{,}505 \,.\, 10^{23} \times 17{,}69 \times 1{,}602\,2 \,.\, 10^{-13}\ ,$$

soit $\mathbf{\mathscr{E} = 4{,}265\,6 \,.\, 10^{11}\ J}$.

b) Il faudrait donc brûler un volume V d'essence, tel que :

$$V = \frac{4{,}26 \,.\, 10^{11}}{3{,}5 \,.\, 10^{7}} \approx \mathbf{12\ 200\ L}\ .$$

15

SOLUTIONS AQUEUSES

RÉSUMÉ DU COURS

Solutions aqueuses

- L'eau peut dissoudre un certain nombre de substances solides, liquides ou gazeuses. On obtient des solutions aqueuses de ces substances.

- L'eau constitue le **solvant** de la solution, et la substance dissoute constitue le **soluté**.

Composition d'une solution aqueuse

Définition de la concentration molaire d'un constituant

La concentration molaire d'un constituant A est la quantité de matière de A, exprimée en mole, présente dans un litre de solution. On la représente par la formule de l'espèce chimique A écrite entre crochets $[A]$, ou encore par $C(A)$.

Si la quantité de A dissous est $n(A)$, dans un volume final V, on a alors :

$$\boxed{C(A) = [A] = \frac{n(A)}{V}}$$

Unités : $C(A)$ et $[A]$ en mole par litre (mol . L^{-1}), $n(A)$ en mole (mol) et V en litre (L).

■ **Définition de la concentration massique d'un constituant**

La concentration massique de A dans une solution, notée $\tau(A)$, est égale au quotient de la masse $m(A)$, par le volume V de la solution :

$$\boxed{\tau(A)=\frac{m(A)}{V}}$$

Unités : $\tau(A)$ en gramme par litre ($g.L^{-1}$), $m(A)$ en gramme (g) et V en litre (L).

Masse volumique, densité

■ La masse volumique ρ d'un corps est égale au quotient de la masse m du corps par son volume V :

$$\boxed{\rho=\frac{m}{V}}$$

Unités : dans le Système International, l'unité de masse volumique est le $kg.m^{-3}$; dans la pratique, on utilise le $g.cm^{-3}$ ou le $g.L^{-1}$.

■ La densité d des liquides et des solides est donnée par rapport à l'eau. Elle est égale au quotient de la masse m d'un volume V de ce corps à la masse m_0 d'un même volume d'eau :

$$\boxed{d=\frac{m}{m_0}=\frac{\rho}{\rho_0}}$$

Unité : d est sans unité.

Préparation de solutions de concentration déterminée

Pour obtenir au laboratoire une solution de concentration déterminée, on peut soit dissoudre un composé solide, soit diluer une solution de concentration connue.

■ **Premier cas :** par dissolution d'un composé solide A de masse molaire $M(A)$.
On veut obtenir un volume V de solution A de concentration C.
La quantité n de solide dissous devra être :

$$\boxed{n=C.V}$$

La masse du composé solide à dissoudre sera donc :

$$\boxed{m=n.M(A)}$$

Cette masse m, d'abord pesée, est ensuite placée dans une fiole jaugée de volume V.
On ajoute de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge de la fiole.
On agite pour homogénéiser ; la solution est prête.

▩ Deuxième cas : par dilution d'une solution de concentration connue.
Soit à préparer un volume V de solution A , de concentration C , à partir d'une solution A de concentration C_0 connue.
On prélève un volume V_0 de la solution A de concentration C_0 ; on dilue cette solution jusqu'à l'obtention d'un volume final V.
Dans la solution initiale, la quantité de soluté A est égale à C_0V_0 ; l'addition d'eau ne modifie pas cette quantité ; on a donc $n_0 = n$, soit :

$$\boxed{C_0 . V_0 = C . V}$$

c'est-à-dire $V_0 = \frac{C}{C_0} . V$.

Il suffit de prendre un volume V_0 de A avec une pipette jaugée ou une burette graduée et de la diluer dans de l'eau distillée pour obtenir le volume V désiré ; ce mélange s'effectue dans une fiole jaugée de volume V.

DES EXERCICES ■

Les masses molaires atomiques nécessaires à tous les calculs sont données en fin d'ouvrage.

Quantité de matière

15.1 Quelle est la quantité de matière dans :

a) 1 L d'eau pure (on supposera que l'eau pure ne contient que des molécules H_2O) ?

b) 20 g de chlorure d'hydrogène HCl ?

c) 440 g de dioxyde de carbone CO_2 ?

Calculs de concentration

15.2 Dilution

On verse $m = 5$ g d'éthanol dans une fiole jaugée de 100 mL et on complète avec de l'eau distillée jusqu'au trait de repère.
Quelle est la concentration molaire de la solution obtenue ? L'éthanol a pour formule brute C_2H_6O.

15.3 Concentration d'espèces chimiques dans des solutions ioniques

On considère deux solutions aqueuses :

a) de chlorure de potassium KCl de concentration 10^{-2} mol . L^{-1} ;

b) d'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$ de concentration 10^{-4} mol . L^{-1}.
Ces espèces sont totalement dissociées en solution :

$$KCl \xrightarrow{\text{eau}} K^+ + Cl^-.$$

$$Ca(OH)_2 \xrightarrow{\text{eau}} Ca^{2+} + 2\,OH^-.$$

Quelles sont les concentrations molaires des diverses espèces présentes dans chacune de ces solutions ?

15.4 Concentrations dans un mélange

On mélange $V_1 = 10^{-1}$ L de solution de chlorure de sodium de concentration $C_1 = 0{,}2$ mol . L^{-1} avec $V_2 = 4 . 10^{-2}$ L de chlorure de sodium de concentration $C_2 = 0{,}3$ mol . L^{-1}.
Quelles sont les concentrations des ions Na^+ et Cl^- dans le mélange final ?

Préparation de solutions

15.5 Dissolution

Quelle masse m de cristaux de permanganate de potassium $KMnO_4$ doit-on utiliser pour préparer 0,5 L d'une solution décimolaire ($C = 10^{-1}$ mol . L^{-1}) de permanganate de potassium ?

♦ 15.6 Solution d'acide oxalique

L'acide oxalique commercial cristallisé a pour formule :
$H_2C_2O_4$, $2\,H_2O$. On veut préparer 200 mL d'une solution aqueuse d'acide oxalique de concentration $3 . 10^{-2}$ mol . L^{-1}.

1° Quel matériel doit-on utiliser ?

2° Quelle masse de cristaux faut-il dissoudre ?

♦ 15.7 Préparation d'une solution par dilution

On dispose d'une solution d'acide chlorhydrique de concentration $C_0 = 10^{-1}$ mol . L^{-1}. On veut préparer 100 mL d'une solution de concentration $C = 5 . 10^{-2}$ mol . L^{-1}.

1° Quelle verrerie doit-on utiliser ?

2° Quel volume de la solution initiale doit-on prélever et compléter avec de l'eau distillée pour obtenir 100 mL de la solution désirée ?

♦ 15.8 Solutions diluées de concentrations différentes

On dispose d'une solution mère de concentration C_0 et on veut obtenir différentes solutions de concentrations $\frac{C_0}{x}$ (x étant un nombre quelconque).
Quels volumes V_0 de la solution mère faut-il prélever pour obtenir un volume V des solutions cherchées ?
Application numérique : $C_0 = 10^{-2}$ mol . L^{-1} ; $V = 100$ mL ; $x = 10$.

Masse volumique et quantité de matière

♦ 15.9 L'étiquette portée par un flacon d'une solution commerciale d'acide sulfurique donne les indications suivantes :
- masse volumique : $\rho = 1\,830$ kg . m^{-3} ;
- concentration : $[H_2SO_4] = 18$ mol . L^{-1}.

Quelle est la quantité d'acide H_2SO_4 pur qui se trouve dans 20 g de cette solution du commerce ?

Densité, masse volumique, concentration

♦♦ **15.10** On dispose au laboratoire d'un flacon d'acide chlorhydrique. Son étiquette porte les indications suivantes :

- acide chlorhydrique commercial ;
- densité par rapport à l'eau : $d = 1{,}19$;
- pourcentage en masse d'acide pur : 37 % ;
- masse molaire du chlorure d'hydrogène : $M(\mathrm{HCl}) = 36{,}5\ \mathrm{g\,.\,mol^{-1}}$.

1° À partir de ces données, calculer la concentration massique τ et la concentration molaire C de la solution commerciale.

2° On prélève $5\ \mathrm{cm^3}$ de cette solution et on complète à $100\ \mathrm{mL}$ avec de l'eau distillée. Calculer la concentration molaire de la solution obtenue.

CORRIGÉS DES EXERCICES

15.1 *a*) Rappelons que 1 L d'eau a pour masse 1 kg et que :
$1\ \mathrm{L} = 1\ \mathrm{dm}^3 = 1\,000\ \mathrm{cm}^3 = 1\,000\ \mathrm{mL}$.
$M(\mathrm{H_2O}) = 2 \times 1 + 16 = 18\ \mathrm{g\,.\,mol^{-1}}$.
La quantité de matière H_2O est :

$$n = \frac{m(\mathrm{H_2O})}{M(\mathrm{H_2O})} = \frac{1000}{18} \approx \mathbf{55{,}5\ mol}.$$

b) Chlorure d'hydrogène, de formule HCl :
$M(\mathrm{HCl}) = 1 + 35{,}5 = 36{,}5\ \mathrm{g\,.\,mol^{-1}}$;

$$n = \frac{m(\mathrm{HCl})}{M(\mathrm{HCl})} = \frac{20}{36{,}5} \approx \mathbf{0{,}55\ mol}.$$

c) Dioxyde de carbone, de formule CO_2 :
$M(\mathrm{CO_2}) = 12 + 2 \times 16 = 44\ \mathrm{g\,.\,mol^{-1}}$;

$$n = \frac{m(\mathrm{CO_2})}{M(\mathrm{CO_2})} = \frac{440}{44} = \mathbf{10\ mol}.$$

15.2 $M(\mathrm{C_2H_6O}) = 12 \times 2 + 1 \times 6 + 16 = 46\ \mathrm{g\,.\,mol^{-1}}$.
Quantité d'éthanol apportée :

$$n = \frac{m}{M} = \frac{5}{46} = 10{,}9\,.\,10^{-2}\ \mathrm{mol}.$$

Cette quantité se trouve dans un volume de 100 mL. La concentration est :

$$C(\mathrm{C_2H_6O}) = \frac{10{,}9\,.\,10^{-2} \times 1\,000}{100},\ \text{soit}\ C(\mathrm{C_2H_6O}) = \mathbf{1{,}09\ mol\,.\,L^{-1}}.$$

15.3 *a*) KCl est totalement dissocié :

$$\mathrm{KCl} \xrightarrow{\text{eau}} \mathrm{K^+} + \mathrm{Cl^-}.$$

Il y a donc autant d'ions K^+ et Cl^- que d'entités KCl dissoutes ; donc :
$\mathbf{[K^+] = 10^{-2}\ mol\,.\,L^{-1}}$ et $\mathbf{[Cl^-] = 10^{-2}\ mol\,.\,L^{-1}}$.

b) $\mathrm{Ca(OH)_2} \xrightarrow{\text{eau}} \mathrm{Ca^{2+}} + 2\,\mathrm{OH^-}$.
Si le nombre de moles d'ions Ca^{2+} est toujours égal au nombre de moles $Ca(OH)_2$, alors $\mathbf{[Ca^{2+}] = 10^{-4}\ mol\,.\,L^{-1}}$.
Il n'en est pas de même pour les ions OH^-.
Une mole de $Ca(OH)_2$ donne deux moles d'ions OH^-, donc :
$\mathbf{[OH^-] = 2\,.\,10^{-4}\ mol\,.\,L^{-1}}$.

15.4 • La première solution apporte une quantité d'ions Cl^- égale à la quantité d'entités NaCl mises en solution, soit $n_1 = C_1 . V_1$.

• La deuxième solution apporte la quantité $n_2 = C_2 . V_2$.

• Le volume de la solution finale est $V = V_1 + V_2$; la concentration des ions Cl^- dans cette solution est :

$$[Cl^-] = \frac{C_1V_1 + C_2V_2}{V_1 + V_2}, \text{ d'où } [Cl^-] = \frac{0{,}2 . 10^{-1} + 0{,}3 \times 4 . 10^{-2}}{10^{-1} + 4 . 10^{-2}} = 0{,}229,$$

soit $\mathbf{[Cl^-] = 0{,}229\ mol . L^{-1}}$.

Le même raisonnement conduit à : $\mathbf{[Na^+] = 0{,}229\ mol . L^{-1}}$.

Remarque : l'électroneutralité de la solution impose : $[Na^+] = [Cl^-]$.

15.5 $M(KMnO_4) = 39{,}1 + 54{,}9 + 16 \times 4 = 158\ g . mol^{-1}$.

Une solution décimolaire devra donc contenir, par litre, une masse m' telle que :

$$m' = M . C = 158 \times 0{,}1 = 15{,}8\ g.$$

La concentration massique de la solution est donc : $\tau = 15{,}8\ g . L^{-1}$.

Pour préparer 0,5 L de solution, il faut une masse m telle que $\tau = \frac{m}{V}$, soit :

$$\mathbf{m = \tau . V = 15{,}8 \times 0{,}5 = 7{,}9\ g}.$$

15.6 1° Le matériel à utiliser est : **une balance de précision ; une spatule pour prélever l'acide oxalique ; une capsule pour le recueillir ; une fiole jaugée de 200 mL avec un bouchon adapté**.

2° La masse molaire de l'acide oxalique cristallisé de formule : $H_2C_2O_4, 2H_2O$, est :

$M = (1 \times 2 + 12 \times 2 + 16 \times 4) + 2(1 \times 2 + 16)$, soit $M = 126\ g . mol^{-1}$.

Un volume $V = 200$ mL de solution de concentration $C = 3 . 10^{-2}\ mol . L^{-1}$ contiendra une quantité n de solide dissous, telle que :

$n = C . V$, soit $n = 3 . 10^{-2} \times 0{,}2 = 6 . 10^{-3}$ mol.

La masse à dissoudre est donc :

$m = n . M$, soit $\mathbf{m = 6 . 10^{-3} \times 126 = 0{,}756\ g}$.

15.7 1° Il faut : **un bécher** pour verser la solution concentrée ; **une pipette graduée** pour en prélever un volume connu ; **une fiole jaugée** de volume égal à celui de la solution diluée désirée ; **un bouchon** pour pouvoir agiter et homogénéiser la solution.

2° Soit V_0 le volume cherché de la solution mère. Le volume de la solution fille contiendra une quantité $n = C . V$ d'acide chlorhydrique.

Cette quantité n est apportée par le volume V_0 de la solution mère :

$$n = C_0 \,.\, V_0 .$$

Donc $C \,.\, V = C_0 \,.\, V_0$, d'où $V_0 = \frac{C}{C_0} \,.\, V$,

soit $V_0 = \frac{5 \,.\, 10^{-2}}{10^{-1}} \times 100$, donc $\mathbf{V_0 = 50\ cm^3}$.

Notre solution finale sera obtenue en diluant $50\ \text{cm}^3$ de la solution mère avec $50\ \text{cm}^3$ d'eau distillée.

15.8 On a $C = \frac{C_0}{x}$. Appliquons la relation de la dilution $C \,.\, V = C_0 \,.\, V_0$.

On en tire $\frac{C_0}{x} \,.\, V = C_0 \,.\, V_0$, donc $V_0 = \frac{V}{x}$.

Application numérique : $\mathbf{V_0 = \frac{100}{10} = 10\ mL}$.

On prélèvera $10\ \text{mL}$ de la solution mère et on complétera à $100\ \text{mL}$ avec de l'eau distillée.

15.9 $\rho = 1\,830\ \text{kg} \,.\, \text{m}^{-3}$, soit $\rho = 1\,830\ \text{g} \,.\, \text{L}^{-1}$.

Dans $1\ \text{L}$ de solution, soit $1\,830\ \text{g}$, il y a 18 moles de matière ; dans $20\ \text{g}$ de solution, la quantité de matière est :

$$\mathbf{n = \frac{18 \times 20}{1\,830} \approx 0{,}197\ mol}.$$

15.10 **1°** ■ La masse de $1\ \text{L}$ de solution est :
$m = d \,.\, \rho_{\text{eau}} \,.\, V$, d'où $m = 1\,190\ \text{g}$.

Le pourcentage massique η d'un constituant A d'un mélange est égal à 100 fois le quotient de la masse $m(A)$ de A dans le mélange, par la masse m de ce mélange :

$$\eta = 100 \,.\, \frac{m(A)}{m}, \text{ soit } m(A) = \frac{m \,.\, \eta}{100}, \text{ d'où } m(A) = \frac{1190 \times 37}{100} = 440{,}3\ \text{g}.$$

La concentration massique est : $\mathbf{\tau = 440{,}3\ g \,.\, L^{-1}}$.

■ La quantité de matière correspondante est :

$$n = \frac{\tau}{M(\text{HCl})} = \frac{440{,}3}{36{,}5} = 12{,}1\ \text{mol} \,.\, \text{L}^{-1}.$$

La concentration cherchée est : $\mathbf{C = 12{,}1\ mol \,.\, L^{-1}}$.

2° Appliquons la formule relative à la dilution : $C_0 \,.\, V_0 = C \,.\, V$,

d'où $C = C_0 \,.\, \frac{V_0}{V} = 12{,}1 \times \frac{5}{100}$, soit $\mathbf{C = 0{,}605\ mol \,.\, L^{-1}}$.

16

NOTION DE COUPLE OXYDANT - RÉDUCTEUR

RÉSUMÉ DU COURS

Les métaux et leurs ions

Les métaux et leurs ions

- **Les métaux** conduisent la chaleur, l'électricité, et réfléchissent la lumière.
Un métal donne facilement des ions chargés positivement, appelés cations. Ces cations existent dans les solides ioniques, ou cristaux ioniques.

- **Les cristaux** ioniques peuvent se dissoudre dans l'eau en libérant les ions qui les constituent. En solution aqueuse, tous les ions sont hydratés.

Tests de reconnaissance de cations métalliques (à mémoriser) :

nom	symbole	réactif utilisé	produit de la réaction
Argent	Ag^+	Cl^-	$Ag^+ + Cl^- \rightarrow AgCl$ précipité blanc
Cuivre	Cu^{2+}	OH^-	$Cu^{2+} + 2\,OH^- \rightarrow Cu(OH)_2$ précipité bleu
Fer	Fe^{2+}	OH^-	$Fe^{2+} + 2\,OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$ précipité verdâtre

… nom	symbole	réactif utilisé	produit de la réaction
Zinc	Zn^{2+}	OH^-	$Zn^{2+} + 2\,OH^- \rightarrow Zn(OH)_2$ précipité blanc, soluble dans un excès de soude $Zn(OH)_2 + 2\,OH^- \rightarrow Zn(OH)_4^{2-}$
Plomb	Pb^{2+}	I^-	$Pb^{2+} + 2\,I^- \rightarrow PbI_2$ précipité jaune vif

Couple oxydant - réducteur

Définition d'une oxydoréduction

Si on plonge une lame de fer (Fe) dans une solution ionique contenant l'ion cuivre II, on constate l'apparition d'un dépôt de cuivre (Cu), et la disparition progressive du fer (Fe).

La réaction chimique s'interprète par l'équation :

$$Cu^{2+} + Fe \rightarrow Cu + Fe^{2+}.$$

L'équation-bilan de cette réaction est obtenue en superposant les deux demi-équations électroniques de manière que le nombre d'électrons perdus par le métal fer (Fe) soit égal au nombre d'électrons gagnés par l'ion cuivre II (Cu^{2+}) :

$$\begin{array}{l} Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2\,e^- \\ Cu^{2+} + 2\,e^- \rightarrow Cu \\ \hline Cu^{2+} + Fe \rightarrow Cu + Fe^{2+}. \end{array}$$

Cette réaction-bilan est une **oxydoréduction**.

L'espèce chimique qui **cède** des électrons est un **réducteur**.

L'espèce chimique qui **capte** des électrons est un **oxydant**.

Couple oxydant - réducteur

Réciproquement, l'ion Fe^{2+} peut jouer le rôle d'oxydant par rapport au métal zinc Zn :

$$Fe^{2+} + Zn \rightarrow Fe + Zn^{2+}.$$

Ce qui conduit, pour le couple (Fe^{2+}, Fe), à envisager une demi-réaction électronique possible dans les deux sens :

$$Fe^{2+} + 2\,e^- \rightleftarrows Fe.$$

Le couple oxydant-réducteur est noté Fe^{2+}/Fe, l'espèce oxydante étant écrite la première. En généralisant :

$$Ox + n\,e^- \underset{\text{oxydation}}{\overset{\text{réduction}}{\rightleftarrows}} Red.$$

Réaction d'oxydoréduction

Elle peut être considérée comme la superposition de deux équations électroniques (fictives) écrites de manière qu'aucun électron n'apparaisse dans le bilan final.
Ainsi, les deux couples :

$$\begin{cases} Ox_1 + n_1 e^- \rightleftarrows Red_1 \\ Ox_2 + n_2 e^- \rightleftarrows Red_2 \end{cases}$$

pourront donner l'une des deux réactions possibles selon :

$$n_2 Ox_1 + n_1 Red_2 \rightleftarrows n_2 Red_1 + n_1 Ox_2 .$$

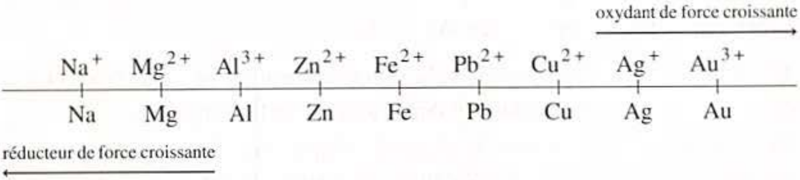
Classification électrochimique

Si on considère les deux couples rédox Cu^{2+}/Cu et Fe^{2+}/Fe, l'expérience montre dans quel sens une réaction est possible spontanément ; il s'agit de la réaction :

$$Fe + Cu^{2+} \rightarrow Fe^{2+} + Cu ,$$

alors que la réaction inverse ne peut pas se produire spontanément.

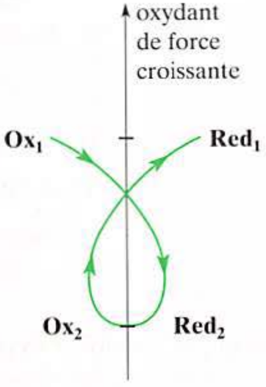
D'une manière générale, une réaction d'oxydoréduction résulte d'une compétition entre deux couples rédox. Elle se produit spontanément entre l'oxydant le plus fort et le réducteur le plus fort. On peut donc expérimentalement établir une classification des couples rédox :


oxydant de force croissante
Na^+
Mg^{2+}
Al^{3+}
Zn^{2+}
Fe^{2+}
Pb^{2+}
Cu^{2+}
Ag^+
Au^{3+}
Na
Mg
Al
Zn
Fe
Pb
Cu
Ag
Au
réducteur de force croissante

Cette classification met en évidence que plus un oxydant est fort, plus son réducteur conjugué est faible.
Elle peut être utilisée pour prévoir le sens des réactions spontanées.

Règle du γ : un oxydant peut oxyder tout réducteur placé au-dessous de lui dans la classification. On obtient les réactifs, puis les produits en suivant le sens des flèches.

$$n_2 Ox_1 + n_1 Red_2 \rightarrow n_2 Red_1 + n_1 Ox_2 .$$


oxydant
de force
croissante
Ox_1
Red_1
Ox_2
Red_2

Tests de reconnaissance

16.1 1° Une solution inconnue (S) est incolore. L'ajout de quelques gouttes d'une solution de chlorure de sodium à (S) provoque l'apparition d'un précipité blanc qui noircit à la lumière. Quelle est la nature de ce précipité ?

2° Une solution inconnue est bleutée. L'ajout de quelques gouttes d'hydroxyde de sodium donne un précipité bleu.

a) À quel ion peut être attribuée la teinte bleutée de la solution ?

b) Quels sont les ions responsables de la formation du précipité observé ?

c) Donner la formule et le nom de ce précipité.

Classement des couples oxydant-réducteur

16.2 Place du couple Au^{3+}/Au

L'or (Au) a pour couple rédox Au^{3+}/Au.

1° Dans un bécher, on met une solution de chlorure d'or, $Au^{3+} + 3\,Cl^-$, et un fil d'argent. On constate un dépôt d'or sur le fil d'argent.
Déduire de cette expérience la place du couple Au^{3+}/Au par rapport au couple Ag^+/Ag dans la classification des couples rédox.

2° Écrire l'équation-bilan de la réaction entre Au^{3+} et Ag.

16.3 Comparer trois oxydants

On donne les équations-bilans des réactions d'oxydoréduction spontanées suivantes :

$$Hg^{2+} + 2\,I^- \rightarrow Hg + I_2 \qquad (1)$$

$$Hg + Cl_2 \rightarrow Hg^{2+} + 2\,Cl^- \qquad (2).$$

1° Donner les couples rédox intervenant dans chacune de ces réactions.

2° Ces réactions sont formées d'une oxydation et d'une réduction. Écrire les équations-bilans de ces demi-réactions en précisant le rôle de chaque entité chimique.

3° Comparer le pouvoir oxydant des oxydants rencontrés et établir une classification par ordre de pouvoir oxydant croissant de ces trois couples rédox.

16.4 Place du couple Ni^{2+}/Ni

Les solutions de sulfate de nickel II ont une belle couleur verte due à l'ion Ni^{2+} (plus exactement, à l'ion hydraté $Ni(H_2O)_6^{2+}$).

1° Si on plonge une lame de fer dans une solution de nickel II, on observe la formation d'un dépôt métallique. Écrire l'équation-bilan de la réaction.

2° Si on plonge une lame de plomb dans une solution de sulfate de nickel II, aucun dépôt n'apparaît. Montrer que ces deux expériences permettent de prévoir la place du couple Ni^{2+}/Ni par rapport aux couples Pb^{2+}/Pb et Fe^{2+}/Fe dans la classification des couples oxydant-réducteur.

16.5 Classement des réducteurs et des oxydants

On donne les équations-bilans, non équilibrées, des réactions rédox spontanées suivantes :

$$Hg^{2+} + Al \rightarrow Hg + Al^{3+}$$

$$Au^{3+} + Al \rightarrow Au + Al^{3+}$$

$$Au^{3+} + Hg \rightarrow Au + Hg^{2+}.$$

1° Équilibrer, s'il y a lieu, ces équations-bilans.

2° Parmi les espèces chimiques intervenant ci-dessus, quel est :

a) l'oxydant le plus fort ? *b*) le réducteur le plus fort ?

3° Classer les réducteurs et les oxydants par pouvoirs réducteur et oxydant croissants.

Utilisation de la classification des couples oxydant - réducteur

16.6 Prévoir une réaction

En utilisant la classification des couples oxydant-réducteur, prévoir si chacun des systèmes suivants donne lieu à une réaction spontanée. Écrire, dans ce cas, l'équation-bilan de la réaction prévue.

a) $Ag^+ + Zn$; *b*) $Fe + Zn^{2+}$; *c*) $Cu^{2+} + Ag$;

d) $Al + Cu^{2+}$; *e*) $Fe^{2+} + Ag$; *f*) $Pb + Zn^{2+}$.

16.7 Le bon choix d'un récipient

Les agriculteurs traitent leurs vignes à l'aide d'un produit pulvérisé, à base d'ions Cu^{2+} (en fait de la « bouillie bordelaise » : mélange de sulfate de cuivre et de chaux). Les pulvérisateurs sont en cuivre (ou en matière plastique).

Pourquoi les pulvérisateurs ne sont-ils pas en fer ou en zinc ?

♦ 16.8 Prévisions

Le cuivre, au contact d'une solution de sulfate de mercure II contenant les ions mercure Hg^{2+}, se recouvre d'un dépôt gris de mercure qui s'amalgame avec le cuivre.

1° *a*) Expliquer la formation du dépôt gris.

b) Écrire l'équation-bilan de la réaction.

2° Peut-on, grâce à cette expérience, prévoir ce qui se passera dans les cas suivants ?

a) On dépose une goutte d'une solution de chlorure de mercure II sur un morceau de fer.

b) On dépose une goutte d'une solution de chlorure de mercure II sur un morceau de plomb.

c) On introduit une goutte de mercure dans une solution de chlorure de cuivre II.

♦♦ 16.9 Action du zinc sur l'ion Cu^{2+}

Dans un bécher, on dissout une masse $m = 5{,}0$ g de sulfate de cuivre II hydraté, de formule $CuSO_4, 5\,H_2O$. On obtient une solution bleue dont le volume total est $V = 100$ mL.

1° Quelle est la concentration C des ions Cu^{2+} de cette solution ?

2° Dans le bécher, on place une lame de zinc (Zn). La décoloration de la solution se produit peu à peu.

a) Quelle réaction se produit-il ?

b) Écrire l'équation-bilan de la réaction qui a lieu.

♦♦ 16.10 Utiliser la classification électrochimique

On mélange une solution de nitrate d'argent $(Ag^+ + NO_3^-)$ et une solution de sulfate de cuivre $(Cu^{2+} + SO_4^{2-})$.
En utilisant la classification des couples rédox, répondre aux questions suivantes.

1° Les ions Ag^+ et Cu^{2+} peuvent-ils réagir entre eux ?

2° On plonge une lame d'argent dans ce mélange, qu'observe-t-on ?

3° On plonge une lame de cuivre dans ce mélange, qu'observe-t-on ?

16.1 1° Les ions chlorure ajoutés réagissent avec les ions argent pour donner **un précipité de chlorure d'argent AgCl blanc** :

$$Ag^+ + Cl^- \rightarrow AgCl.$$

Le chlorure d'argent noircit lentement à la lumière et donne de l'argent métallique.

Note : pour confirmer ce résultat, on peut vérifier que ce précipité est soluble dans une solution aqueuse d'ammoniac. Le chlorure d'argent se dissout dans un excès de solution d'ammoniac par formation de l'ion diamine argent I : $[Ag(NH_3)_2]^+$.

2° *a*) La teinte bleutée de la solution est attribuable à l'ion Cu^{2+}, ou plus exactement à l'**ion cuivre hydraté** $Cu(H_2O)_6^{2+}$.

b) Les ions responsables de la formation du précipité bleu sont :

- l'**ion cuivre II** : Cu^{2+} ;
- l'**ion hydroxyde** : OH^-.

c) Le précipité bleu est de l'**hydroxyde de cuivre II : $Cu(OH)_2$**.

16.2 1° Un oxydant réagit sur tout réducteur associé à un oxydant moins fort que lui.
Ici, Au^{3+} a été réduit en or selon la réaction :

$$Au^{3+} + 3\,e^- \rightarrow Au.$$

Donc l'argent métal a été oxydé selon la réaction :

$$Ag \rightarrow Ag^+ + e^-.$$

Le couple Au^{3+}/Au est situé **à droite du couple Ag^+/Ag** sur l'axe horizontal de la classification des couples rédox.

2° Équation-bilan de la réaction observée :

$$\begin{array}{lr} Au^{3+} + 3\,e^- \rightarrow Au & \times 1 \\ Ag \rightarrow Ag^+ + e^- & \times 3 \\ \hline \mathbf{Au^{3+} + 3\,Ag \rightarrow Au + 3\,Ag^+}. & \end{array}$$

16.3 1° Dans la réaction (1), on a les couples oxydant-réducteur :

$$\mathbf{Hg^{2+}/Hg} \text{ et } \mathbf{I_2/I^-}.$$

Dans la réaction (2), on a les couples : $\mathbf{Hg^{2+}/Hg}$ et $\mathbf{Cl_2/Cl^-}$.

2° • Dans la réaction (1) :

$$Hg^{2+} + 2\,e^- \xrightarrow{\text{réduction}} Hg.$$

Hg^{2+} est l'oxydant et Hg le réducteur conjugué.

$$2\,I^- \xrightarrow{\text{oxydation}} I_2 + 2\,e^-.$$

L'ion iodure I^- est le réducteur, et I_2 l'oxydant conjugué.

- Dans la réaction (2) :

$$Cl_2 + 2\,e^- \xrightarrow{\text{réduction}} 2\,Cl^-.$$

Cl_2 est l'oxydant et Cl^- le réducteur conjugué du couple Cl_2/Cl^-.

$$Hg \xrightarrow{\text{oxydation}} Hg^{2+} + 2\,e^-.$$

Hg est le réducteur et l'ion mercure II ; Hg^{2+} est l'oxydant conjugué du couple Hg^{2+}/Hg.

3° Une réaction d'oxydo-réduction se produit lorsque l'on met en compétition l'oxydant le plus fort avec le réducteur le plus fort.

- Dans la réaction (1), on déduit que l'**ion Hg^{2+} est plus oxydant que I_2.**
- Dans la réaction (2), **le dichlore Cl_2 est plus oxydant que l'ion Hg^{2+}.**

Cela nous donne, pour les trois oxydants, le classement par ordre de pouvoir oxydant croissant : **I_2 ; Hg^{2+} ; Cl_2.**

16.4 1° Le dépôt métallique ne peut être formé que de nickel ; l'ion Ni^{2+} a donc été réduit en Ni et le fer oxydé en Fe^{2+}.

$$\begin{array}{l}
Ni^{2+} + 2\,e^- \rightarrow Ni \\
\qquad\qquad Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2\,e^- \\
\hline
\mathbf{Ni^{2+} + Fe \rightarrow Ni + Fe^{2+}.}
\end{array}$$

Le couple Ni^{2+}/Ni possède un oxydant, Ni^{2+}, plus fort que celui du couple Fe^{2+}/Fe, c'est-à-dire Fe^{2+}.

Le nickel est moins réducteur que le fer.

2° Le plomb, lui, est sans action sur la solution de sulfate de nickel II ; le nickel est donc plus réducteur que le plomb.

Conclusion : **le couple Ni^{2+}/Ni se situe dans la classification entre les couples Pb^{2+}/Pb et Fe^{2+}/Fe.**

16.5 1° Équilibrons ces équations-bilan :

$$\mathbf{3\,Hg^{2+} + 2\,Al \rightarrow 3\,Hg + 2\,Al^{3+}}$$

(conservation des éléments et des charges électriques).

$$\mathbf{Au^{3+} + Al \rightarrow Au + Al^{3+}.}$$

$$\mathbf{2\,Au^{3+} + 3\,Hg \rightarrow 2\,Au + 3\,Hg^{2+}.}$$

2° Les réactions citées précédemment montrent que :

a) L'ion Au^{3+} du couple rédox Au^{3+}/Au oxyde le mercure Hg ; il est donc un plus fort oxydant que l'ion Hg^{2+} du couple Hg^{2+}/Hg.
L'ion Hg^{2+} du couple rédox Hg^{2+}/Hg oxyde l'aluminium ; il est donc plus fort que l'oxydant Al^{3+} du couple Al^{3+}/Al.
Au^{3+} est donc l'oxydant le plus fort.

b) Inversement, **Al est le réducteur le plus fort**, car Al réduit Hg^{2+} du couple Hg^{2+}/Hg, et Hg réduit Au^{3+} du couple Au^{3+}/Au.

3° Le classement de ces réducteurs et de ces oxydants découle des considérations ci-dessus :

- pouvoir oxydant croissant : **Al^{3+} ; Hg^{2+} ; Au^{3+}** ;
- pouvoir réducteur croissant : **Au ; Hg ; Al**.

16.6 *a*) Oxydation de Zn en Zn^{2+} et réduction de Ag^{+} en Ag selon :

$$2\,Ag^{+} + Zn \rightarrow 2\,Ag + Zn^{2+}.$$

b) **Pas de réaction** : dans les deux couples mis en jeu, le meilleur oxydant est Fe^{2+} et le meilleur réducteur, Zn.

c) **Pas de réaction** : Ag est moins réducteur que Cu.

d) Oxydation de Al en Al^{3+} et réduction de Cu^{2+} en Cu selon :

$$3\,Cu^{2+} + 2\,Al \rightarrow 3\,Cu + 2\,Al^{3+}.$$

e) **Pas de réaction** : Ag est moins réducteur que Fe.

f) **Pas de réaction** : Zn est meilleur réducteur que Pb.

16.7 Le couple Cu^{2+}/Cu ayant l'oxydant le plus fort (*cf.* axe de classification des couples rédox, p. 351) réagirait sur le réducteur associé à l'oxydant le moins fort, c'est-à-dire le fer ou le zinc, et **le pulvérisateur serait progressivement détérioré**.

16.8 1° *a*) *Note :* un amalgame est un alliage de mercure et d'un autre métal.
Le dépôt gris est formé, en partie, de mercure métallique. Les ions mercure II ont donc été réduits par le métal cuivre.

b) L'équation-bilan de la réaction observée est :

$$Hg^{2+} + Cu \rightarrow Hg + Cu^{2+}.$$

2° Dans la classification des couples oxydant-réducteur, le couple Hg^{2+}/Hg possède donc l'oxydant le plus fort.

Comme le fer et le plomb sont des réducteurs plus forts que le cuivre, ils seront oxydés par les ions Hg^{2+}.

a) $\mathbf{Hg^{2+} + Fe \rightarrow Hg + Fe^{2+}}$.

b) $\mathbf{Hg^{2+} + Pb \rightarrow Hg + Pb^{2+}}$.

c) Par contre, **le mercure ne sera pas oxydé** par les cations Cu^{2+}.

16.9 1° Dans la solution, la quantité de Cu^{2+} est égale à la quantité de sulfate de cuivre II dissoute dans l'eau.

Si M est la masse molaire du sulfate de cuivre II hydraté, la quantité n de Cu^{2+} est :

$$n = \frac{m}{M},$$

et la concentration C des ions Cu^{2+} :

$$C = \frac{n}{V} = \frac{m}{M \,.\, V}.$$

$M = 249{,}6\ \text{g}\,.\,\text{mol}^{-1}$; $m = 5{,}0\ \text{g}$; $V = 0{,}1\ \text{L}$.

D'où $C = \dfrac{5}{249{,}6 \times 0{,}1} = 0{,}2\ \text{mol}\,.\,\text{L}^{-1}$, soit $C = 0{,}2\ \text{mol}\,.\,\text{L}^{-1}$.

2° *a*) La solution se décolore : **les ions Cu^{2+} disparaissent peu à peu**. Ils sont réduits en métal Cu par le zinc Zn. **Le zinc est oxydé en ions Zn^{2+}**. On a une réaction d'oxydoréduction, mettant en présence les couples Cu^{2+}/Cu et Zn^{2+}/Zn.

b)

$$\begin{array}{rcl} Cu^{2+} + 2e^- & \rightarrow & Cu \\ Zn & \rightarrow & Zn^{2+} + 2e^- \\ \hline \mathbf{Cu^{2+} + Zn} & \rightarrow & \mathbf{Cu + Zn^{2+}}. \end{array}$$

16.10 1° **Non**, car les espèces chimiques Ag^+ et Cu^{2+} sont déjà oxydées ; aucun échange d'électrons n'est possible ; aucune réaction d'oxydoréduction ne peut avoir lieu.

2° **On n'observe rien**. L'argent est moins réducteur que le cuivre : aucune réaction n'est possible.

3° **On observe un dépôt d'argent**. Le cuivre est plus réducteur que l'argent :

$$\begin{array}{rcll} Cu & \rightarrow & Cu^{2+} + 2e^- & \times 1 \\ Ag^+ + e & \rightarrow & Ag & \times 2 \\ \hline \mathbf{2Ag^+ + Cu} & \rightarrow & \mathbf{2Ag + Cu^{2+}}. & \end{array}$$

17

COUPLE H^+/H_2 - CLASSIFICATION ÉLECTROCHIMIQUE

RÉSUMÉ DU COURS

Solutions acides

Acidité :
À 25 °C , une solution aqueuse est acide si son pH est inférieur à 7 ; elle est basique si son pH est supérieur à 7 .
Les solutions acides contiennent l'ion hydrogène H^+ . La concentration en ions H^+ détermine le pH de la solution acide.

La solution d'acide chlorhydrique :
Les solutions aqueuses de chlorure d'hydronium HCl portent le nom de solutions d'acide chlorhydrique.

Ces solutions contiennent des ions H^+ et Cl^- mais aucune molécule HCl .

Les molécules de chlorure d'hydrogène sont dissociées dans l'eau selon :

$$\boxed{HCl \xrightarrow{eau} H^+ + Cl^-}$$

Si C est la concentration de l'acide :

$$\boxed{C = [H^+] = [Cl^-]}$$

🟩 **La solution d'acide sulfurique H_2SO_4 :**

Une solution d'acide sulfurique contient des ions H^+ et des ions SO_4^{2-} (ions sulfate) :

$$\boxed{H_2SO_4 \xrightarrow{\text{eau}} 2\,H^+ + SO_4^{2-}}$$

Si C est la concentration de l'acide :

$$\boxed{[H^+] = 2\,C \quad \text{et} \quad [SO_4^{2-}] = C}$$

Remarque : si la solution est très diluée, elle contient aussi des ions HSO_4^-.

Le couple H^+/H_2

🟩 L'acide chlorhydrique, l'acide sulfurique dilué réagissent sur **certains** métaux. Ainsi, l'acide chlorhydrique réagit sur le fer, Fe, mais il ne réagit pas sur le cuivre. L'expérience montre qu'au cours de la réaction de l'acide chlorhydrique sur le fer, il y a :

- dégagement de dihydrogène H_2 et disparition d'ions H^+ ;
- formation d'ions Fe^{2+} et disparition de fer ;
- la concentration en ions Cl^- ne change pas.

Les seuls corps réagissant sont le fer, Fe, et les ions hydrogène H^+ ; les produits formés sont : H_2 et Fe^{2+}.

On peut donc écrire l'équation-bilan :

$$\boxed{Fe + 2\,H^+ \rightarrow Fe^{2+} + H_2}$$

Cette réaction peut être considérée comme la somme des deux demi-réactions :

$$\left\{\begin{array}{r} Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2\,e^- \\ 2\,H^+ + 2\,e^- \rightarrow H_2. \end{array}\right.$$

Deux couples rédox sont intervenus : Fe^{2+}/Fe et H^+/H_2.

Place du couple H^+/H_2

🟩 L'acide chlorhydrique et l'acide sulfurique réagissent sur le fer, le zinc, mais ils ne réagissent pas sur le cuivre.

H^+ est réduit par le fer, le couple H^+/H_2 se trouve à droite du couple Fe^{2+}/Fe sur l'axe de la classification représenté ci-après.

Le cuivre est sans action. Le couple H^+/H_2 se trouve à gauche du couple Cu^{2+}/Cu sur ce même axe.

Le couple H^+/H_2 se situe entre les couples Fe^{2+}/Fe et Cu^{2+}/Cu (plus exactement entre les couples Pb^{2+}/Pb et Cu^{2+}/Cu).

Classification :

oxydant de force croissante →

Al^{3+}	Zn^{2+}	Fe^{2+}	Pb^{2+}	H^+	Cu^{2+}	Ag^+
Al	Zn	Fe	Pb	H_2	Cu	Ag

réducteur de force croissante ←

Conclusion :

Les métaux plus réducteurs que le dihydrogène donnent un dégagement de dihydrogène par action sur une solution diluée d'acide chlorhydrique ou sulfurique.

Étude quantitative

Bilan de matière :

L'équation-bilan d'une réaction chimique traduit des relations de proportionnalité entre les nombres de moles des différents corps purs intervenant dans la réaction ; il s'agit avant tout d'un bilan molaire, c'est-à-dire de quantité de matière.

Mais, comme à chaque mole de corps pur correspond sa masse molaire, l'équation-bilan donnera aussi les proportions en masse des réactifs et des produits.

Lorsque des réactifs ou des produits sont à l'état gazeux, le bilan molaire permet de déterminer les volumes gazeux mis en jeu.

Volume molaire des gaz

Le volume molaire V_m est le volume occupé par une mole de molécules gazeuses.

Loi d'Avogadro-Ampère : dans les mêmes conditions de température et de pression, tous les gaz ont le même volume molaire V_m. Dans les conditions habituelles de température (20 °C) et de pression (10^5 Pa = 1 bar), le volume molaire vaut :

$$\boxed{V_m = 24{,}4\ \mathrm{L \cdot mol^{-1}}}$$

Bilan d'électricité :

La quantité d'électricité mise en jeu au cours de la réaction d'oxydoréduction est égale à la valeur absolue de la charge électrique transférée.

La valeur absolue de la charge électrique d'une mole d'électrons est appelée **faraday** (symbole : $\mathcal{F}$) :

$$\boxed{1\ \mathcal{F} = 9{,}65 \cdot 10^4\ \mathrm{C \cdot mol^{-1}}}$$

DES EXERCICES ■

17.1 Connaître l'acide chlorhydrique

L'acide chlorhydrique est obtenu par dissolution du chlorure d'hydrogène dans l'eau.

1° Le chlorure d'hydrogène est-il un composé ionique ou moléculaire ?

2° La solution d'acide chlorhydrique contient-elle :

a) des ions H^+ ?

b) des ions Cl^- ?

c) des molécules HCl ?

3° Une solution d'acide chlorhydrique a pour concentration :

$$C = 0{,}2\ \text{mol}\,.\,\text{L}^{-1}.$$

Quelle est la quantité de matière d'ions H^+ contenue dans 200 mL de cette solution ?

17.2 Action de l'acide chlorhydrique sur le fer

On plonge une lame de fer de masse $m = 0{,}60$ g dans un bécher contenant un volume $V = 200$ mL d'une solution d'acide chlorhydrique de concentration $C = 10^{-2}\ \text{mol}\,.\,\text{L}^{-1}$.

1° Écrire l'équation-bilan de la réaction qui se produit.

2° *a*) La lame de fer est-elle totalement dissoute par la solution d'acide chlorhydrique ?

b) Dans le cas négatif, quelle est la masse m' de fer qui n'a pas été attaquée ?

3° Quel est le volume V' de gaz qui se dégage ? ($V_m = 24{,}4\ \text{L}\,.\,\text{mol}^{-1}$.)

17.3 Volume molaire des gaz

Une masse $m = 0{,}2$ g de poudre de fer est mélangée à $100\ \text{cm}^3$ d'une solution d'acide sulfurique dont la concentration en H^+ est :

$$[H^+] = 10^{-1}\ \text{mol}\,.\,\text{L}^{-1}.$$

1° Y a-t-il disparition totale du métal ?

2° Quel est le volume du gaz obtenu si, dans les conditions de l'expérience, le volume molaire est de 24 L ?

3° Après décantation, on évapore la solution restante.
Quelle est la masse de sulfate de fer II, $FeSO_4,\ 7\,H_2O$ obtenue ?

♦ 17.4 Séparer deux éléments d'un minerai

1° Le métal cobalt est attaqué par l'acide sulfurique pour donner des ions Co^{2+}.

a) Écrire l'équation-bilan de la réaction.

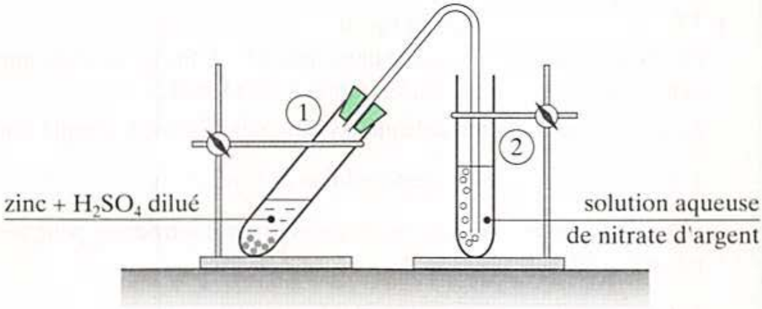
b) Que peut-on en déduire en ce qui concerne la force de l'oxydant du couple Co^{2+}/Co ?

2° Le cobalt est extrait en même temps que le cuivre d'un minerai complexe ; on obtient un alliage métallique de cuivre et de cobalt.
Proposer une méthode permettant de séparer les deux éléments.

3° L'attaque d'une masse de 1 kg d'alliage par de l'acide sulfurique en excès se traduit par une perte de masse de 124 g.
Calculer la composition massique de l'alliage.

♦♦ 17.5 Action de H_2 sur Ag^+

On réalise l'expérience schématisée ci-dessous :



1° *a*) Écrire l'équation-bilan de la réaction qui se produit dans le tube ①.

b) Indiquer les oxydants et réducteurs que l'on a placés et les espèces qui s'oxydent et qui se réduisent dans le tube ①.

2° Le dihydrogène qui se dégage du tube ① barbote dans une solution aqueuse de nitrate d'argent $AgNO_3$ placée dans le tube ②. Il apparaît dans ② un dépôt noir d'argent Ag finement divisé.

a) Écrire l'équation-bilan de la réaction d'oxydoréduction s'effectuant dans ②.

b) Classer les couples d'oxydoréduction qui interviennent.

3° On a utilisé 4 g de zinc. La réaction dans ① est totale. Dans ②, seulement 10 % du dihydrogène formé réagit, le reste s'échappant.
Quelle masse d'argent obtient-on dans ② ?

♦♦ 17.6 Étude quantitative de la réduction de Cu^{2+} par Zn

On prépare une solution de sulfate de cuivre II, en dissolvant 32,2 g de cristaux bleus dans 500 cm^3 d'eau distillée.
Les cristaux bleus ont pour formule : $CuSO_4, 5\,H_2O$.

1° Quelle est la concentration molaire en ions Cu^{2+} de la solution obtenue ?

2° On ajoute de la poudre de zinc.

a) Que se passe-t-il ?

b) Quelle est la masse minimale de zinc à ajouter dans un bécher contenant 100 cm^3 de la solution précédente si l'on veut faire disparaître la couleur bleue de la solution ?

c) Quelle est la quantité de matière d'électrons échangés ?

d) Quelle est la quantité d'électricité correspondante ?

Donnée : $1\,\mathcal{F} = 9{,}65 \cdot 10^4\,C \cdot mol^{-1}$.

♦ 17.7 Bilan d'une réaction totale

On plonge une lame de cuivre dans 100 mL d'une solution de nitrate d'argent $(Ag^+ + NO_3^-)$ de concentration $C = 0{,}1\ mol \cdot l^{-1}$.
Le couple Ag^+/Ag possède un oxydant plus fort que le couple Cu^{2+}/Cu.

1° Écrire, s'il y a lieu, l'équation-bilan de la réaction.

2° Quelle masse minimale m de cuivre faut-il introduire pour faire disparaître l'oxydant le plus fort ?

3° Quelle est la masse m' de métal formé (déposé).

4° On filtre la solution ; le filtrat est évaporé.

a) Quel produit obtient-on ?

b) Quelle en est la masse m'' du composé anhydre ?

17.8 Débarrasser une eau d'un élément dangereux

Un bassin de récupération des eaux d'une usine a un volume de 10 000 m^3. Ces eaux contiennent l'ion mercure II : Hg^{2+} à raison de 5 g par m^3. Pour éliminer ces ions mercure, on brasse l'eau avec de la poudre de fer.

1° Quelle réaction a lieu dans le bassin, sachant que le fer est passé à l'état d'ions Fe^{2+} ?

2° Quelle masse de fer faut-il utiliser ?

♦ 17.9 Action de l'étain sur une solution de sulfate de cuivre

L'étain Sn réduit les ions Cu^{2+} par une réaction totale et donne l'ion Sn^{2+}. On fait réagir 4 g de poudre d'étain sur 100 mL d'une solution de sulfate de cuivre II à $0{,}2\ \mathrm{mol \cdot L^{-1}}$.

1° Écrire l'équation-bilan de la réaction.

2° Quelle est la concentration de la solution en ions Sn^{2+} en fin de réaction ?

3° La solution est filtrée, quelle est la masse du solide recueilli ?

4° Ce solide recueilli est traité par de l'acide chlorhydrique : il se dégage du dihydrogène.

a) Écrire l'équation-bilan de la réaction qui a lieu.

b) Quel est le volume V de gaz qui se dégage ? ($V_m = 24{,}4\ \mathrm{L \cdot mol^{-1}}$.)

♦ 17.10 Action du fer sur du nitrate de plomb

Dans un bécher contenant 50 mL d'une solution de nitrate de plomb ($Pb^{2+} + 2\,NO_3^-$), on introduit 10 g de poudre de fer. On agite puis on filtre la solution. On recueille ainsi 12,05 g de poudre métallique formée de fer et de plomb.

Quelle est la concentration de la solution de nitrate de plomb ?

CORRIGÉS DES EXERCICES

17.1 1° Le chlorure d'hydrogène est un gaz dans les conditions ordinaires de température et de pression. Il est constitué de molécules HCl.
Le gaz HCl est facilement liquéfiable.
Ce liquide n'est pas conducteur de courant électrique : il ne renferme donc pas de porteurs de charges, c'est-à-dire d'ions. C'est un **composé moléculaire**.

2° La solution d'acide chlorhydrique a des propriétés fondamentalement différentes du chlorure d'hydrogène.

a) et *b*) La solution d'acide chlorhydrique **ne renferme que des ions H^+ et Cl^-**.

c) **Elle ne contient pas de molécules HCl**.

3° La solution d'acide chlorhydrique a pour concentration $C = 0{,}2\ \text{mol} \,.\, \text{L}^{-1}$; comme elle ne comporte que des ions, la concentration en H^+ est :

$$[H^+] = C = 0{,}2\ \text{mol} \,.\, \text{L}^{-1}.$$

La quantité de matière n d'ions H^+ vaut $n = [H^+] \,.\, V$,
d'où $\mathbf{n = 0{,}2 \times 0{,}2 = 4 \,.\, 10^{-2}\ mol}$.

17.2 1° Les ions H^+ de l'acide chlorhydrique oxydent le fer en ìon fer II (Fe^{2+}) et sont réduits en dihydrogène H_2.
Équation-bilan :

$$\begin{array}{rcl} 2\,H^+ + 2\,e^- & \rightarrow & H_2 \\ Fe & \rightarrow & Fe^{2+} + 2\,e^- \\ \hline \mathbf{2\,H^+ + Fe} & \rightarrow & \mathbf{Fe^{2+} + H_2 \nearrow}. \end{array}$$

2° *a*) La quantité de matière de H^+ est :

$$n = C \,.\, V = 10^{-2} \times 0{,}2 = 2 \,.\, 10^{-3}\ \text{mol}.$$

D'après l'équation-bilan de la réaction, deux moles d'ions H^+ oxydent une mole de fer.

Donc, à la quantité n d'ions H^+ correspond la quantité d'ions $\frac{n}{2}$ de fer.

La masse de fer qui peut agir est donc :

$$m_0 = \frac{n}{2} \,.\, M_{Fe}, \quad \text{d'où} \quad m_0 = \frac{2 \,.\, 10^{-3}}{2} \times 55{,}8 = 5{,}58 \,.\, 10^{-2}\ \text{g},$$

soit $m_0 \approx 0{,}06\ \text{g} < 0{,}60\ \text{g}$.
Tout le fer n'a donc pas réagi.

b) Il reste une masse m' de fer telle que :

$m' = m - m_0$, d'où $m' = 0{,}60 - 0{,}06$, soit $\mathbf{m' = 0{,}54\ g}$.

3° Il se dégage $\dfrac{n}{2}$ moles de gaz hydrogène H_2, correspondant à un volume V' tel que :

$$V' = \frac{n}{2} \, . \, V_m, \quad \text{d'où} \quad V' = \frac{2 \, . \, 10^{-3}}{2} \times 22{,}4 = 22{,}4 \, . \, 10^{-3}\ \text{L},$$

soit $\mathbf{V' = 22{,}4\ mL}$.

17.3

1° L'équation-bilan de la réaction est :

$$\text{Fe} + 2\,\text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{H}_2 .$$

La quantité de fer utilisée est :

$n_{\text{Fe}} = \dfrac{0{,}2}{55{,}8} \approx 3{,}58 \, . \, 10^{-3}$ mol, soit 3,58 mmol.

La quantité d'ions H^+ dans la solution est :

$n_{H+} = [H^+] \, . \, V = 10^{-1} \times 0{,}1 = 10 \, . \, 10^{-3}$ mol, soit 10 mmol.

D'après l'équation-bilan, l'oxydation de n_{Fe} nécessite une quantité d'ions H^+ égale à $2n_{\text{Fe}}$.

Les ions H^+ sont donc en excès $(10 > 2 \times 3{,}58)$ par rapport au fer : **le métal est totalement oxydé.**

2° La quantité de H_2 qui se forme est égale à la quantité de Fe disparue :

$n_{H_2} = n_{\text{Fe}} = 3{,}58$ mmol ; or $V_{H_2} = n_{H_2} \, . \, V_m = n_{\text{Fe}} \, . \, V_m$,

d'où $V_{H_2} = 3{,}58 \, . \, 10^{-3} \times 24 = 85{,}9 \, . \, 10^{-3}$ L, soit $\mathbf{V_{H_2} = 85{,}9\ mL}$.

3° La masse molaire de $FeSO_4$, $7\,H_2O$ est $M = 277{,}9\ \text{g} \, . \, \text{mol}^{-1}$.

La masse de sulfate de fer obtenue est :

$m = n \, . \, M = n_{\text{Fe}}$, donc $\mathbf{m = 0{,}995\ g \approx 1\ g}$.

17.4

1° *a*) Le bilan de la réaction d'oxydoréduction qui se produit est :

$$\mathbf{Co + 2\,H^+ \rightarrow Co^{2+} + H_2} .$$

b) **Le métal cobalt est plus réducteur que le dihydrogène. L'oxydant Co^{2+} du couple Co^{2+}/Co est moins oxydant que H^+.**

2° Le mélange des métaux Cu et Co contient un métal plus réducteur que H_2, le cobalt, et un métal moins réducteur que H_2, le cuivre.

L'action de H^+ permet donc de les séparer : le cobalt est oxydé en Co^{2+} et passe donc en solution, tandis que Cu reste inattaqué.

3° On considère une masse d'alliage de 1 kg. Celui-ci renferme une masse $m_{Co} = 124$ g (car ceci représente la perte en masse du cobalt passé en solution sous forme d'ions Co^{2+}).

La masse m_{Cu} que renferme l'alliage est donc :

$$m_{Cu} = 1\,000 - 124 = 876 \text{ g}.$$

La composition massique de l'alliage est :

- **pourcentage de métal Co** : $\frac{124}{1\,000} \times 100 = \mathbf{12{,}4\ \%}$;
- **pourcentage de métal Cu** : $\frac{876}{1\,000} \times 100 = \mathbf{87{,}6\ \%}$.

17.5 **1°** *a*) La réaction-bilan qui se produit dans le tube ① est :

$$\mathbf{Zn + 2\,H^+ \rightarrow Zn^{2+} + H_2} \quad ①.$$

b) L'oxydant est l'**ion H^+** car il capte un électron ; il est donc réduit.
Le réducteur est le **métal Zn** car il donne des électrons ; il est donc oxydé.
Les couples rédox mis en jeu sont H^+/H_2 et Zn^{2+}/Zn.

2° *a*) Il apparaît un dépôt d'argent métallique ; l'ion Ag^+ a été réduit selon :

$$Ag^+ + e^- \rightarrow Ag.$$

Seul H_2 a pu fournir des électrons, donc :

$$H_2 \rightarrow 2\,H^+ + 2\,e^-.$$

L'équation-bilan de la réaction d'oxydoréduction est :

$$\mathbf{H_2 + 2\,Ag^+ \rightarrow 2\,H^+ + 2\,Ag} \quad ②.$$

b) Ag^+ a capté des électrons au dihydrogène ; c'est donc l'oxydant le plus fort : **le couple Ag^+/Ag possède un oxydant plus fort que le couple H^+/H_2.**

3° La quantité de zinc métallique attaqué est :

$$n_{Zn} = \frac{m}{M} = \frac{4}{65{,}4} = 0{,}061\,2 \text{ mol}.$$

La quantité n_{H_2} de H_2 obtenue est égale à la quantité de zinc ayant réagi : $n_{H_2} = n_{Zn} = 0{,}061\,2$ mol (d'après l'équation-bilan de la réaction ①).

Seule la quantité $n' = n_{H_2} \times \frac{10}{100}$ va réagir, soit :

$$n' = 0{,}061\,2 \times \frac{10}{100} = 6{,}12 \,.\, 10^{-3} \text{ mol}.$$

L'équation-bilan de la réaction ② montre qu'une mole de H_2 donne deux moles d'argent métallique. Nous obtiendrons :

$n_{\mathrm{Ag}} = 2n'$, soit $n_{\mathrm{Ag}} = 12{,}24\,.\,10^{-3}\,\mathrm{mol}$.

Comme $M_{\mathrm{Ag}} = 107{,}87\,\mathrm{g}\,.\,\mathrm{mol}^{-1}$, la masse d'argent obtenue sera :

$m_{\mathrm{Ag}} = n_{\mathrm{Ag}}\,.\,M_{\mathrm{Ag}}$, donc $\boldsymbol{m_{\mathrm{Ag}} = 1{,}32\,\mathrm{g}}$.

17.6 1° La masse molaire M des cristaux de sulfate de cuivre est :

$$M = 249{,}6\,\mathrm{g}\,.\,\mathrm{mol}^{-1}.$$

La dissolution d'une masse m d'un corps pur de masse molaire M conduit à une quantité n de ce corps pur égale à $n = \dfrac{m}{M}$.

Cette quantité de matière étant dissoute dans un volume V, la concentration C du soluté est :

$$C = \frac{n}{V} = \frac{m}{M\,.\,V}, \quad \text{donc} \quad C = \frac{32{,}2}{249{,}6 \times 0{,}5} = \mathbf{0{,}258\ mol\,.\,L^{-1}}.$$

2° *a*) On observe la réaction d'oxydoréduction spontanée suivante :

$$\mathbf{Cu^{2+} + Zn \rightarrow Cu + Zn^{2+}}.$$

b) La couleur bleue étant due aux ions Cu^{2+} hydratés, la réaction s'accompagne de la décoloration de la solution car les ions Zn^{2+} donnent une solution aqueuse incolore.

Un volume V' de la solution précédente contient la quantité de matière n' d'ions Cu^{2+}, telle que $n' = C\,.\,V'$.

Pour réduire cette quantité de matière, il faut une quantité égale de zinc, soit une masse :

$m_{\mathrm{Zn}} = n'\,.\,M_{\mathrm{Zn}} = C\,.\,V'\,.\,M_{\mathrm{Zn}}$, donc $m_{\mathrm{Zn}} = 0{,}258 \times 0{,}1 \times 65{,}4 \approx \mathbf{1{,}69\ g}$.

c) Chaque ion Cu^{2+} nécessite deux électrons pour sa réduction, donc :

$$n(\mathrm{e}^-) = 2\,.\,n' = 5{,}16\,.\,10^{-2}\,\mathrm{mol}.$$

d) La quantité d'électricité correspondante est :

$q = n(\mathrm{e}^-)\,.\,1\,\mathcal{F}$, d'où $q = 5{,}16\,.\,10^{-2} \times 9{,}65\,.\,10^{4}$, soit $\boldsymbol{q = 4{,}98\,\mathrm{kC}}$.

17.7 1° Le couple Ag^+/Ag possédant l'oxydant le plus fort, l'équation-bilan de la réaction sera :

$$\underset{1\,\mathrm{mol}}{\mathbf{Cu}} + \underset{2\,\mathrm{mol}}{\mathbf{2\,Ag^+}} \rightarrow \underset{1\,\mathrm{mol}}{\mathbf{Cu^{2+}}} + \underset{2\,\mathrm{mol}}{\mathbf{2\,Ag}}.$$

2° La quantité d'ions Ag^+ dans la solution est :

$$n = C\,.\,V = \frac{1}{10} \times 0{,}1 = 10^{-2}\,\mathrm{mol}.$$

La quantité de cuivre nécessaire est :

$$n' = \frac{n}{2} = 0{,}5\,.\,10^{-2}\ \text{mol}\,.$$

La masse minimale m de cuivre à prendre est :

$$m = n'\,.\,M_{\text{Cu}} = 0{,}5\,.\,10^{-2} \times 63{,}5 = \mathbf{0{,}32\ g}\,.$$

3° La masse m' de métal argent déposé est :

$$m' = n\,.\,M_{\text{Ag}} = 10^{-2} \times 108 = \mathbf{1{,}08\ g}\,.$$

4° *a*) Le filtrat obtenu renferme : les ions Cu^{2+} produits par l'oxydation et les ions nitrate NO_3^- qui n'ont pas réagi.
Le produit obtenu sera le **nitrate de cuivre II** : $Cu\,(NO_3)_2$.

b) La quantité de $Cu\,(NO_3)_2$ formée est égale à la quantité d'ions n' de Cu^{2+} qui sont apparus, soit $n' = 0{,}5\,.\,10^{-2}$ mol.

Comme $M_{Cu\,(NO_3)_2} = 187{,}5\ \text{g}\,.\,\text{mol}^{-1}$:

$$m'' = 0{,}5\,.\,10^{-2} \times 187{,}5 = \mathbf{0{,}94\ g}\,.$$

17.8 **1° Le fer est passé à l'état d'ions Fe^{2+} :**

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2\,e^- \qquad ①.$$

L'ion Hg^{2+} a été réduit :

$$Hg^{2+} + 2\,e^- \rightarrow Hg \qquad ②.$$

L'équation-bilan ① + ② est :

$$Fe + Hg^{2+} \rightarrow Fe^{2+} + Hg \qquad ③.$$

2° La masse d'ions Hg^{2+} contenue dans le bassin est :

$$m = 5 \times 10\,000 = 5\,.\,10^4\ \text{g}\,,$$

ce qui correspond à une quantité de matière égale à :

$$n = \frac{5\,.\,10^4}{201}\ \text{moles d'ions } Hg^{2+}\,.$$

La réaction ③ montre qu'il faut utiliser une même quantité de matière de fer que d'ions Hg^{2+}.

La masse de fer utilisée devra être :

$$m = M_{\text{Fe}}\,.\,n = 56 \times \frac{5\,.\,10^4}{201} = 13\,930{,}3\ \text{g}\,,$$

soit **environ 14 kg de poudre de fer**.

17.9 **1°** L'étain réduit les ions Cu^{2+} ; l'équation-bilan de la réaction est :

$$\mathbf{Sn + Cu^{2+} \rightarrow Sn^{2+} + Cu} \qquad ①.$$

2° La quantité n_{Sn} d'étain utilisée est :

$$n_{\mathrm{Sn}} = \frac{m}{M} = \frac{4}{118{,}69} = 33{,}70 \,.\, 10^{-3} \text{ mol}.$$

La quantité $n_{\mathrm{Cu}^{2+}}$ d'ions Cu^{2+} présents est :

$$n_{\mathrm{Cu}^{2+}} = C \,.\, V = 0{,}2 \times 100 \,.\, 10^{-3} = 20 \,.\, 10^{-3} \text{ mol}.$$

La réaction ① montre que la quantité d'étain Sn qui réagit doit être égale à la quantité d'ions Cu^{2+}.

L'étain est donc en excès, et il va se former $20 \,.\, 10^{-3}$ mole d'ions Sn^{2+} dans les 100 cm^3 de solution.

La concentration en Sn^{2+} est :

$$[\mathrm{Sn}^{2+}] = \frac{n}{V} = \frac{20 \,.\, 10^{-3}}{100 \,.\, 10^{-3}} = \mathbf{0{,}2 \text{ mol} \,.\, L^{-1}}.$$

3° Le filtrat contient :

- L'étain qui n'a pas réagi, soit la quantité :

$$n'_{\mathrm{Sn}} = 33{,}7 \,.\, 10^{-3} - 20 \,.\, 10^{-3} = 13{,}7 \,.\, 10^{-3} \text{ mole d'étain},$$

c'est-à-dire une masse m' d'étain telle que :

$$m'_{\mathrm{Sn}} = M_{\mathrm{Sn}} \,.\, n'_{\mathrm{Sn}} = 118{,}69 \times 13{,}7 \,.\, 10^{-3} = 1{,}62 \text{ g}.$$

- Le métal cuivre qui s'est formé, soit la quantité $20 \,.\, 10^{-3}$ mole, c'est-à-dire la masse :

$$m'_{\mathrm{Cu}} = M_{\mathrm{Cu}} \,.\, n'_{\mathrm{Cu}} = 63{,}5 \times 20 \,.\, 10^{-3} = 1{,}27 \text{ g}.$$

Masse totale du solide sur le filtre : 1,62 g + 1,27 g = **2,89 g**.

4° Seul l'étain réagit avec les ions H^+. Il se dégage du dihydrogène, selon l'équation :

$$\mathrm{Sn} + 2\,\mathrm{H}^+ \rightarrow \mathrm{Sn}^{2+} + \mathrm{H}_2.$$

Cette équation montre qu'il se forme une quantité de dihydrogène H_2 égale à la quantité d'étain recueillie après filtration. Le volume V de dihydrogène qui se dégage est :

$$V = n' \,.\, V_m, \text{ d'où } V = 13{,}7 \,.\, 10^{-3} \times 24{,}4 = 33{,}43 \,.\, 10^{-2} \text{ L} = \mathbf{334 \text{ mL}}.$$

17.10 Puisque le métal plomb est apparu, c'est qu'il y a eu réduction des ions Pb^{2+} par le métal fer, selon l'équation :

$$\mathrm{Pb}^{2+} + \mathrm{Fe} \rightarrow \mathrm{Pb} + \mathrm{Fe}^{2+}.$$

La quantité de fer apportée en poudre vaut :

$$n_{\mathrm{Fe}} = \frac{10}{55{,}8} = 0{,}18 \text{ mol}.$$

Si x moles de fer ont participé à la réaction, il restera, en poudre sur le filtre, $0,18 - x$ moles de fer, soit une masse de fer :

$$m_{\text{Fe}} = 55,8 \times (0,18 - x) \text{ g de fer.}$$

Il apparaîtra x moles de plomb, soit une masse :

$$m_{\text{Pb}} = 207,19x\,.$$

La conservation de la masse entraîne :

$12,05 = 55,8 \times (0,18 - x) + 207,19\,x$, soit $x = 0,013\,5$ moles de plomb.

Ces $0,013\,5$ moles de plomb proviennent des ions Pb^{2+} présents dans les 50 mL de la solution de nitrate de plomb :

$$[\text{Pb}^{2+}] = \frac{0,013\,5}{50\,.\,10^{-3}} = 0,27 \text{ mol}\,.\,\text{L}^{-1}\,.$$

La concentration en nitrate de plomb est de **$0,27$ mol . L^{-1}**.

18

NOTION DE POTENTIEL D'OXYDORÉDUCTION

RÉSUMÉ DU COURS

Pile

Définition d'une demi-pile

C'est un compartiment formé d'une électrode d'un métal M plongeant dans une solution ionique contenant sa forme oxydée M^{n+}.

Une pile est constituée de deux demi-piles reliées par un pont électrolytique : chacune de ces demi-piles met en présence un réducteur (le métal, M) et son oxydant conjugué (le cation M^{n+}).

Contrairement aux réactions d'oxydoréduction, déjà étudiées (où l'échange d'électrons se fait directement entre le réducteur d'un couple et l'oxydant d'un autre couple), dans une pile, le transfert d'électrons se fait par l'intermédiaire d'un conducteur électrique reliant les deux électrodes.

- La demi-pile qui contient l'oxydant le plus fort est du côté du pôle positif de la pile. Dans cette demi-pile a lieu la réduction :

$$M_1^{n+} + n\,e^- \rightarrow M_1 .$$

- La demi-pile qui contient le réducteur le plus fort est du côté du pôle négatif de la pile. Dans cette demi-pile a lieu l'oxydation :

$$M_2 \rightarrow M_2^{n'+} + n'\,e^- .$$

Exemple :

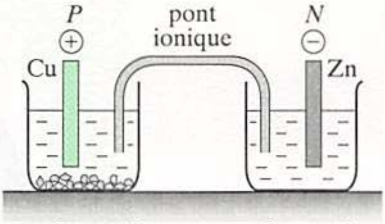
- les demi-piles de la pile Daniell seront notées :

$$Cu/Cu^{2+} \quad , \quad Zn/Zn^{2+}$$

- et la pile Daniell :

$$\boxed{\ominus\ Zn\,|\,Zn^{2+}\ \vdots\ Cu^{2+}\,|\,Cu\ \oplus}$$

(pôle ⊖ à gauche, pôle ⊕ à droite).



pile Daniell

■ Force électromotrice d'une pile

La f.e.m. E d'une pile est la tension qui existe entre ses bornes en circuit ouvert :

$$\boxed{E = U^{0}_{PN}}$$

La f.e.m. de la pile varie avec la nature des couples mis en jeu, avec les concentrations des ions et peu avec la température.

Les piles sont dites « standard », lorsque toutes les concentrations sont égales à $1\ mol\,.\,L^{-1}$.

Demi-pile à hydrogène

C'est une demi-pile constituée d'une solution d'acide chlorhydrique ; dans cette solution plonge une électrode de platine, elle-même recouverte d'une poudre très fine de platine. Un courant de dihydrogène barbote dans la solution et se fixe superficiellement sur le platine.

Lorsque la pression du dihydrogène est égale à 1 bar (10^5 Pa) et lorsque la concentration en H^+ est égale à $[H^+] = 1\ mol\,.\,L^{-1}$ (pH = 0), la demi-pile est appelée demi-pile standard ou électrode standard à hydrogène (E.S.H.).

Potentiel d'oxydoréduction

■ Par convention, le potentiel de l'E.S.H. est choisi nul à toute température ; on le note :

$$\boxed{E^0(H^+/H_2) = 0\ V}$$

■ Par définition, le potentiel d'oxydoréduction, ou potentiel rédox, $E(M^{n+}/M)$ d'un couple rédox M^{n+}/M, est égal à la d.d.p. en circuit ouvert, entre l'électrode métallique et l'électrode standard à hydrogène :

$$\boxed{E\,(M^{n+}/M) = V_M - V_{E.S.H.}}$$

Si la demi-pile au métal M est standard, le potentiel d'oxydoréduction est dit standard. Il est noté $E^0(M^{n+}/M)$.

E ou E^0 peuvent être positifs ou négatifs, leurs valeurs dépendent de la nature du couple.

Sauf lorsque la concentration est très inférieure à $1\ mol.L^{-1}$, E est voisin de E^0.

Utilisation et propriétés des potentiels rédox

🟩 La réalisation de l'électrode à hydrogène est assez complexe. Il suffit de connaître le potentiel rédox d'une électrode quelconque (ce potentiel ayant été mesuré dans un laboratoire spécialisé) pour en déterminer d'autres.

Exemple : la demi-pile Cu^{2+}/Cu :

$$E^0(Cu^{2+}/Cu) = 0{,}34\ V.$$

🟩 Plus le potentiel standard d'oxydoréduction d'un couple est élevé, plus l'oxydant du couple est fort.

Plus le potentiel standard d'oxydoréduction d'un couple est faible, plus le réducteur est fort.

Lors d'une réaction d'oxydoréduction naturelle (ou spontanée), l'oxydant du couple de plus haut potentiel réagit avec le réducteur de plus bas potentiel. Si l'écart entre les deux potentiels est d'au moins 0,3 V, la réaction d'oxydoréduction peut être considérée comme totale.

🟩 Le pôle ⊕ d'une pile est le métal du couple de potentiel standard le plus élevé ; le pôle ⊖ est constitué par l'électrode correspondant au couple de plus bas potentiel.

🟩 Les potentiels d'oxydoréduction servent à prévoir le sens et la nature des réactions d'oxydoréduction.

ÉNONCÉS DES EXERCICES

Pour tous les exercices, on utilisera le tableau des potentiels standard d'oxydoréduction situé en fin d'ouvrage, p. 349.

Potentiel rédox et réaction chimique

18.1 Test de connaissances

1° Lorsqu'une pile débite dans un circuit, y a-t-il oxydation ou réduction au niveau de l'électrode positive ?

2° Dans une pile, quel est le rôle du pont électrolytique (ou pont salin) ?

3° Pourquoi utiliser un voltmètre électronique pour mesurer la f.e.m. d'une pile ?

4° *a*) Quelle est la polarité d'une pile argent/zinc ?

b) Quelle réaction s'y déroule quand elle débite un courant ?

c) Cette réaction est-elle naturelle ?

5° Quelle est la f.e.m. de la pile Daniell ? Cette pile est constituée des deux demi-piles standard Cu/Cu^{2+} et Zn/Zn^{2+}.

18.2 Utilisation des potentiels rédox

En utilisant la table des potentiels standard, prévoir si les réactions suivantes sont possibles et écrire, s'il y a lieu, leur équation-bilan en indiquant si elles sont quantitatives ou non.

1° On plonge une lame de zinc dans une solution de sulfate de nickel II.

2° On plonge une lame de cuivre dans une solution de chlorure de fer II.

3° On plonge une lame de plomb dans une solution de nitrate d'argent.

4° On plonge une lame d'argent dans une solution de nitrate de cobalt II.

Étude de différentes piles

18.3 F.e.m. d'une pile

Soit une pile formée par deux demi-piles reliées par un pont chimique (ou séparées par une paroi poreuse) : l'une est constituée par le couple rédox Zn^{2+}/Zn (électrode de zinc plongeant dans une solution de sulfate de zinc), l'autre par le couple rédox Mg^{2+}/Mg (électrode de magnésium plongeant dans une solution de chlorure de magnésium).

Dans les conditions de l'expérience, les potentiels rédox sont :

$$E\,(Zn^{2+}/Zn) = -0{,}77\ V \quad \text{et} \quad E\,(Mg^{2+}/Mg) = -2{,}34\ V\,.$$

1° Faire un schéma de la pile. Indiquer les pôles ⊕ et ⊖ de cette pile.

2° Écrire l'équation-bilan de la réaction de la pile quand celle-ci débite.

3° Quelle est la f.e.m. de cette pile ?

18.4 Demi-pile à hydrogène

1° *a*) Faire le schéma d'une demi-pile à hydrogène en y portant les indications nécessaires pour que cette pile soit standard.

b) Quel est le potentiel de cette électrode ?

2° Une demi-pile comportant une tige d'étain Sn plongeant dans une solution d'ions Sn^{2+} (solution de nitrate d'étain $Sn^{2+} + 2\ NO_3^-$), de concentration $C = 1{,}0\ mol\,.\,L^{-1}$, est associée à une E.S.H.

a) Indiquer les bornes ⊕ et ⊖ de cette pile.

b) Écrire le bilan des transformations quand cette pile débite un courant.

c) Donner la f.e.m. de cette pile.

Donnée : $E^0(Sn^{2+}/Sn) = -0{,}14\ V$.

♦ 18.5 Détermination pratique d'un potentiel rédox

On réalise un générateur avec les demi-piles relatives aux couples :

$$Cu^{2+}/Cu \quad \text{et} \quad Mn^{2+}/Mn\,.$$

Les concentrations des ions métalliques dans les solutions aqueuses sont égales à une mole par litre. La f.e.m. de cette pile est de 1,51 V.

1° On connaît le potentiel rédox standard du couple Cu^{2+}/Cu : 0,34 V. Peut-on déduire le potentiel standard du couple Mn^{2+}/Mn ? Justifier votre réponse.

2° L'expérience montre que le métal manganèse est attaqué par l'acide chlorhydrique. Montrer que l'on peut maintenant répondre à la question **1°**.

3° Observe-t-on une réaction en plongeant une lame de zinc dans une solution de chlorure de manganèse II ?

Donnée : potentiel rédox standard du couple Zn^{2+}/Zn : $-0{,}76$ V.

♦ 18.6 Utilisation d'une demi-pile de référence secondaire

On considère une pile constituée par les couples rédox :

$$Cu^{2+}/Cu \quad \text{et} \quad Pb^{2+}/Pb\,.$$

Les deux demi-piles utilisées pour réaliser cette pile sont standard.

1° *a*) Que signifie « demi-pile standard » ?

b) Indiquer la borne ⊕ et la borne ⊖ de cette pile.

c) Donner son diagramme conventionnel.

2° *a*) Quelles sont les réactions qui se produisent aux électrodes lorsque la pile débite ?

b) En déduire l'équation-bilan correspondante.

3° Quelle est la f.e.m. de cette pile ?

4° Le pont électrolytique entre les deux piles contient une solution de chlorure de potassium sous forme de gelée. Quel est son rôle ?

♦ 18.7 Influence de la concentration

On montre que le potentiel d'un couple rédox dépend (faiblement) des concentrations en ions. Lorsque la concentration en ions diminue, le potentiel rédox diminue et quand la concentration augmente, le potentiel rédox augmente.

1° On associe deux demi-piles standard, l'une à argent, l'autre au plomb. Donner :

a) les polarités de cette pile ;

b) la réaction lorsqu'elle débite ;

c) sa f.e.m. initiale.

2° Quand la pile débite, comment varient les concentrations en cations dans les demi-piles ? Comment varie la f.e.m. de la pile au cours de son débit ?

Bilan de masse aux électrodes

♦♦ 18.8 Fonctionnement d'une pile au cuivre et à l'étain

On considère la pile :

$$\mathrm{Sn} \mid \mathrm{Sn}^{2+} \,\vdots\, \mathrm{Cu}^{2+} \mid \mathrm{Cu}.$$

Les deux demi-piles qui la constituent sont standard. $E^0_{\mathrm{Cu}^{2+}/\mathrm{Cu}} = 0{,}34\ \mathrm{V}$.

1° L'expérience montre que le pôle ⊖ de la pile est la lame d'étain, Sn. Lorsque la pile ne débite pas, la d.d.p. entre ses bornes est 0,48 V.
Quel est le potentiel standard du couple rédox $\mathrm{Sn}^{2+}/\mathrm{Sn}$?

2° Écrire l'équation-bilan de la réaction qui s'effectue dans la pile lorsqu'elle débite un courant électrique.

3° La pile débite un courant de 26 mA pendant une durée de 11 minutes. Quelle est la diminution de masse de la lame d'étain ?

4° La pile débite ; au bout d'un certain temps, la masse de la plaque d'étain a diminué de 0,50 g . Quelle est la variation de masse de la lame de cuivre ?

♦♦ 18.9 Durée de vie d'une pile

Une pile Daniell est constituée d'un vase poreux rempli d'une solution de sulfate de cuivre II, immergé dans un vase étanche contenant une solution de sulfate de zinc II. Une lame de zinc plonge dans la solution de sulfate de zinc et une lame de cuivre dans la solution de sulfate de cuivre.

1° Un voltmètre électronique mesure la d.d.p. lorsque la pile ne débite pas. On note : $V_{Cu} - V_{Zn} = 1{,}10\ \mathrm{V}$.

a) Quelle est la f.e.m. de la pile ?

b) Quel est son pôle ⊕ ?

2° *a*) Pourquoi la solution de sulfate de cuivre II est-elle saturée ?

b) En est-il de même pour la solution de sulfate de zinc ? Expliquer pourquoi.

3° La lame de zinc utilisée a pour masse $m = 15$ g et l'intensité du courant débité est $I = 0{,}2$ A . Calculer la durée t de fonctionnement de cette pile.

Mesure des potentiels standard

♦ 18.10 Identifier un couple

On dispose de trois demi-piles standard :

$$X^{2+}/X,\quad Y^{2+}/Y \quad \text{et} \quad Cu^{2+}/Cu.$$

- La pile $X \mid X^{2+} \;\vdots\; Cu^{2+} \mid Cu$ a pour tension à vide en valeur absolue 1,25 V et la masse de son électrode X diminue lorsqu'elle fonctionne.
- La pile $X \mid X^{2+} \;\vdots\; Y^{2+} \mid Y$ a pour tension à vide en valeur absolue 0,47 V et sa concentration en Y^{2+} diminue lorsqu'elle fonctionne.

1° Donner les potentiels standard des couples X^{2+}/X et Y^{2+}/Y .

2° L'un de ces couples est le couple Cr^{3+}/Cr . Trouver l'autre couple à l'aide du tableau des potentiels standard d'oxydoréduction.

18.1 1° Lorsque la pile débite, il y a **réduction** du côté de l'électrode positive : $M^{n+} + n\,e^- \rightarrow M$.

2° Le rôle du pont électrolytique est **d'assurer le contact électrique entre les deux demi-piles et de permettre la migration des ions.**

3° La f.e.m. d'une pile est égale à la d.d.p. mesurée aux bornes de la pile en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque la pile ne débite aucun courant. Un voltmètre électronique ayant une très grande résistance interne **ne laisse circuler qu'un courant insignifiant et peut être utilisé pour la mesure de cette f.e.m.**

4° *a*) La demi-pile Ag^+/Ag a pour potentiel d'oxydoréduction :

$$E^0(Ag^+/Ag) = 0{,}80\ V,$$

et la demi-pile Zn^{2+}/Zn pour potentiel :

$$E^0(Zn^{2+}/Zn) = -\,0{,}76\ V.$$

La demi-pile à argent qui a le potentiel d'oxydoréduction le plus élevé comporte l'électrode positive. La demi-pile au zinc possède l'électrode négative.

b) Au pôle ⊕, il y a **réduction** :

$$Ag^+ + e^- \rightarrow Ag,$$

et au pôle ⊖, il y a **oxydation** :

$$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2\,e^-.$$

Bilan du fonctionnement de la pile :

$$2\,Ag^+ + Zn \rightarrow 2\,Ag + Zn^{2+}.$$

c) C'est une réaction **naturelle** ou **spontanée**.

5° Le cuivre de la demi-pile Cu^{2+}/Cu est au potentiel :
$E^0(Cu^{2+}/Cu) = +\,0{,}34\ V$ par rapport à l'E.S.H.

Le zinc de la demi-pile Zn^{2+}/Zn est au potentiel :
$E^0(Zn^{2+}/Zn) = -\,0{,}76\ V$ par rapport à l'E.S.H.

La f.e.m. est la différence de potentiel entre les deux demi-piles :
$E = E^0(Cu^{2+}/Cu) - E^0(Zn^{2+}/Zn)$, soit $E = 0{,}34 - (-\,0{,}76) = \mathbf{1{,}10\ V}$.

18.2 En confondant potentiels et potentiels standard, nous pouvons prévoir :

1° L'oxydation quantitative du métal zinc par les ions Ni^{2+} selon :

$$\mathbf{Zn + Ni^{2+} \xrightarrow[\text{réaction quantitative}]{} Zn^{2+} + Ni}.$$

2° **L'absence de réaction** des ions Fe^{2+} sur le métal cuivre.

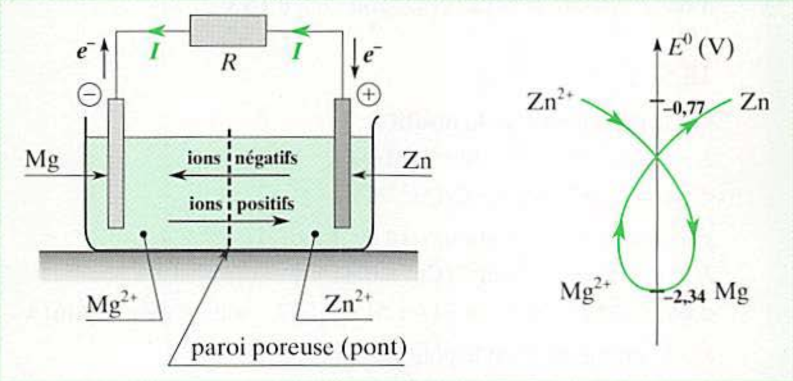
3° L'**oxydation quantitative** du plomb avec les ions Ag^+ selon :

$$\mathbf{Pb + 2Ag^+ \rightarrow Pb^{2+} + Ag}\,.$$

4° **L'absence de réaction** des ions Co^{2+} sur le métal Ag.

18.3 1° Le potentiel de la demi-pile au zinc est supérieur au potentiel de la pile au magnésium, **le pôle ⊕ est donc l'électrode en zinc**.

2°



e^-
I
R
I
e^-
⊖
⊕
Mg
ions négatifs
ions positifs
Zn
Mg^{2+}
Zn^{2+}
paroi poreuse (pont)
E^0 (V)
Zn^{2+}
–0,77
Zn
Mg^{2+}
–2,34
Mg

$$\begin{array}{lrcl}
 & Zn^{2+} + 2\,e^- & \rightarrow & Zn \\
 & Mg & \rightarrow & Mg^{2+} + 2\,e^- \\
\hline
\text{Bilan :} & \mathbf{Zn^{2+} + Mg} & \rightarrow & \mathbf{Zn + Mg^{2+}}\,.
\end{array}$$

3° $E = E^0(Zn^{2+}/Zn) - E^0(Mg^{2+}/Mg)$,

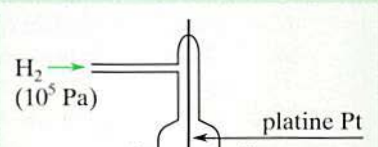
d'où $E = -0{,}77 - (-2{,}34) = 1{,}57$,

soit $E = \mathbf{1{,}57\ V}$.

18.4 1° *a*) **Schéma de l'E.S.H.** :
On met en présence (sur du platine) des ions H^+ et du dihydrogène.

b) $E^0(H^+/H_2) = \mathbf{0\ V}$.

2° *a*) Le potentiel de l'E.S.H. est 0 V, celui de l'électrode d'étain $-0{,}14$ V.
L'E.S.H. possède le couple oxydant le plus fort, c'est donc le pôle positif.



H_2
(10^5 Pa)
platine Pt
H^+
(pH = 0)

E. S. H.

Le pôle négatif sera l'électrode de la demi-pile à étain. La pile peut être représentée par le diagramme :

$$\ominus \quad \mathbf{Sn \mid Sn^{2+} \,\vdots\, H^{+} \mid H_2 \mid Pt} \quad \oplus$$

b) On a :

$$\begin{aligned} 2\,H^{+} + 2\,e^{-} &\rightarrow H_2 \\ Sn &\rightarrow Sn^{2+} + 2\,e^{-} \end{aligned}$$

Bilan :

$$\mathbf{2\,H^{+} + Sn \rightarrow H_2 + Sn^{2+}}.$$

c) Par définition : $E = E^0(H^+/H_2) - E^0(Zn^{2+}/Zn)$,

d'où $E = 0 - (-0{,}14) = 0{,}14$, soit $E = \mathbf{0{,}14\ V}$.

18.5 1° $E = E\oplus - E\ominus$

- Si le **cuivre** est le pôle **positif** :

$E = E\,(Cu^{2+}/Cu) - E\,(Mn^{2+}/Mn)$,

d'où $E\,(Mn^{2+}/Mn) = E\,(Cu^{2+}/Cu) - E$.

Puisque les concentrations sont de $1\ mol.L^{-1}$:

$E\,(Cu^{2+}/Cu) = E^0(Cu^{2+}/Cu) = 0{,}34\ V$,

d'où $E\,(Mn^{2+}/Mn) = 0{,}34 - 1{,}51 = -1{,}17$, soit $E\,(Mn^{2+}/Mn) = -1{,}17\ V$.

- Si le **manganèse** est le pôle **positif** :

$E = E\,(Mn^{2+}/Mn) - E\,(Cu^{2+}/Cu)$,

donc $E\,(Mn^{2+}/Mn) = E + E\,(Cu^{2+}/Cu)$,

d'où $E\,(Mn^{2+}/Mn) = 1{,}51 + 0{,}34 = 1{,}85$, soit $E\,(Mn^{2+}/Mn) = 1{,}85\ V$.

Si aucun renseignement complémentaire n'est fourni, **il est impossible de choisir entre les deux valeurs**.

2° Le métal manganèse est oxydé par les ions H^+. Le métal manganèse est plus réducteur que le dihydrogène ; il est donc plus réducteur que le métal cuivre. **Dans la pile précédente, il constitue donc le pôle négatif** et son potentiel standard est $E^0(Mn^{2+}/Mn) = -1{,}17\ V$.

3° Le potentiel standard du couple Zn^{2+}/Zn est de $-0{,}76\ V$; Zn^{2+} est donc un meilleur oxydant que Mn^{2+}. Le zinc ne peut pas être oxydé par Mn^{2+}. **Aucune réaction sur le zinc.**

18.6 1° *a*) Une demi-pile M^{n+}/M **est dite standard si :**

$$\mathbf{[M^{n+}] = 1\ mol.L^{-1}}.$$

b) Le tableau des potentiels standard nous donne :

$$E^0(Cu^{2+}/Cu) = 0{,}34\ V \quad \text{et} \quad E^0(Pb^{2+}/Pb) = -0{,}13\ V.$$

$E^0(Cu^{2+}/Cu)$ est plus élevé que $E^0(Pb^{2+}/Pb)$, donc **la borne** $\oplus$ **est l'électrode de cuivre** et **la borne** $\ominus$ **l'électrode de plomb.**

c) Diagramme conventionnel de la pile :

$$\ominus \quad \mathbf{Pb} \mid \mathbf{Pb^{2+}} \,\vdots\, \mathbf{Cu^{2+}} \mid \mathbf{Cu} \quad \oplus .$$

2° *a*) L'oxydant le plus fort correspond au potentiel d'oxydoréduction le plus élevé ; ici, c'est l'ion cuivre II qui est l'oxydant plus fort que l'ion plomb II .

Lorsque la pile débite un courant, les électrons pénètrent dans la pile par la borne $\oplus$, **il y a réduction à la borne** $\oplus$:

$$Cu^{2+} + 2\,e^- \rightarrow Cu .$$

À la borne $\ominus$ **il y a oxydation**, le plomb perd des électrons :

$$Pb \rightarrow Pb^{2+} + 2\,e^- .$$

Il y a autant d'ions Cu^{2+} consommés que d'ions Pb^{2+} formés.

b) Bilan de la pile :

$$\mathbf{Cu^{2+} + Pb \rightarrow Cu + Pb^{2+}} .$$

Ce bilan est le même que celui de la réaction spontanée qui se produit entre les ions Cu^{2+} et le métal plomb.

3° Par définition : $E = E^0(Cu^{2+}/Cu) - E^0(Pb^{2+}/Pb)$,

d'où $E = 0{,}34 - (-0{,}13) = 0{,}47$, soit $E = \mathbf{0{,}47\ V}$.

4° • **Du côté** $\oplus$, la solution s'appauvrit en ions Cu^{2+}.
Pour qu'elle reste électriquement neutre, **le pont donne deux ions potassium** K^+ chaque fois que disparaît un ion Cu^{2+}.

• **Du côté** $\ominus$, la solution s'enrichit en ions Pb^{2+}.
Pour qu'elle reste électriquement neutre, **le pont donne deux ions chlorure** Cl^- chaque fois que se forme un ion Pb^{2+}.

18.7 **1°** *a*) Les demi-piles étant standard, leurs potentiels rédox sont :

$$E^0(Ag^+/Ag) = 0{,}80\ V \quad \text{et} \quad E^0(Pb^{2+}/Pb) = -0{,}13\ V .$$

L'électrode d'argent est le pôle $\oplus$ **, celle de plomb, le pôle** $\ominus$.

b) La réaction de fonctionnement est donc :

$$\mathbf{Pb + 2\,Ag^+ \rightarrow Pb^{2+} + 2\,Ag} .$$

c) Par définition : $E = E^0(Ag^+/Ag) - E^0(Pb^{2+}/Pb)$,

d'où $E = 0{,}8 - (-0{,}13) = 0{,}93$, soit $E = \mathbf{0{,}93\ V}$.

2° Lorsque la pile débite :

- $Ag^+ + e^- \rightarrow Ag$, et $[Ag^+]$ décroît, donc $E(Ag^+/Ag)$ diminue.
- $Pb \rightarrow Pb^{2+} + 2\,e^-$, et $[Pb^{2+}]$ croît, donc $E(Pb^{2+}/Pb)$ augmente.

La f.e.m. de la pile qui est leur différence diminue donc.

18.8 1° E se confond avec la tension entre les bornes lorsque la pile ne débite pas.

$E = E^0(\mathrm{Cu}^{2+}/\mathrm{Cu}) - E^0(\mathrm{Sn}^{2+}/\mathrm{Sn})$,

donc $E^0(\mathrm{Sn}^{2+}/\mathrm{Sn}) = E^0(\mathrm{Cu}^{2+}/\mathrm{Cu}) - E$,

d'où $E^0(\mathrm{Sn}^{2+}/\mathrm{Sn}) = 0{,}34 - 0{,}48 = -0{,}14$, soit $E^0(\mathrm{Sn}^{2+}/\mathrm{Sn}) = \mathbf{-0{,}14\ V}$.

2° Au pôle ⊕, les électrons qui arrivent du circuit extérieur provoquent la réduction des ions Cu^{2+} :

$$\mathrm{Cu}^{2+} + 2\,\mathrm{e}^- \rightarrow \mathrm{Cu}.$$

Au pôle ⊖, le métal étain s'oxyde en ions Sn^{2+} :

$$\mathrm{Sn} \rightarrow \mathrm{Sn}^{2+} + 2\,\mathrm{e}^-.$$

Bilan dans la pile : $\mathbf{Cu^{2+} + Sn \rightarrow Cu + Sn^{2+}}$.

3° La demi-équation $\mathrm{Sn} \rightarrow \mathrm{Sn}^{2+} + 2\,\mathrm{e}^-$ montre que la quantité de matière n_{Sn} d'étain consommée est égale à la moitié de la quantité de matière n_{e^-} d'électrons injectés dans le circuit extérieur :

$$n_{\mathrm{Sn}} = \frac{n_{\mathrm{e}^-}}{2}.$$

Calculons n_{e^-} : la quantité d'électricité qui a été produite est $q = I \cdot t$, en coulomb.

Cela représente $n_{\mathrm{e}^-} = \dfrac{q}{\mathcal{F}}$.

($\mathcal{F}$ est le symbole du faraday, il représente la valeur absolue de la charge d'une mole d'électrons ; $1\,\mathcal{F} = 9{,}65 \cdot 10^4\ \mathrm{C \cdot mol^{-1}}$.)

$$n_{\mathrm{Sn}} = \frac{n_{\mathrm{e}^-}}{2} = \frac{q}{2\mathcal{F}} = \frac{I \cdot t}{2\mathcal{F}}.$$

La masse d'étain consommée sera : $m_{\mathrm{Sn}} = M_{\mathrm{Sn}} \cdot n_{\mathrm{Sn}} = \dfrac{M_{\mathrm{Sn}} \cdot I \cdot t}{2\mathcal{F}}$,

d'où $m_{\mathrm{Sn}} = \dfrac{118{,}7 \times 26 \cdot 10^{-3} \times 11 \times 60}{2 \times 9{,}65 \cdot 10^4} = 10{,}55 \cdot 10^{-3}$,

soit $m_{\mathrm{Sn}} = \mathbf{10{,}5\ mg}$.

4° L'équation-bilan dans la pile :

$$\mathrm{Sn} + \mathrm{Cu}^{2+} \rightarrow \mathrm{Sn}^{2+} + \mathrm{Cu},$$

montre que la quantité de matière d'étain consommée est égale à la quantité de matière de cuivre déposée sur la lame de cuivre : $n_{\mathrm{Sn}} = n_{\mathrm{Cu}}$.

Comme $n_{\mathrm{Sn}} = \dfrac{m_{\mathrm{Sn}}}{M_{\mathrm{Sn}}}$, on a $m_{\mathrm{Cu}} = n_{\mathrm{Cu}} \cdot M_{\mathrm{Cu}} = \dfrac{m_{\mathrm{Sn}} \cdot M_{\mathrm{Cu}}}{M_{\mathrm{Sn}}}$,

d'où $m_{\mathrm{Cu}} = \dfrac{0{,}50 \times 63{,}5}{118{,}7} = 0{,}267$.

La masse de cuivre a augmenté de 267 mg.

18.9 1° *a*) Lorsque la pile ne débite pas, $I = 0$ A ; aux bornes de la pile, on a (*cours de seconde*) :

$V_{\text{Cu}} - V_{\text{Zn}} = E - r \, . \, I$, et comme $I = 0$ A :

$V_{\text{Cu}} - V_{\text{Zn}} = E$, soit $E = \mathbf{1{,}10\ V}$.

b) Tel que nous l'indique le voltmètre, le potentiel de la lame de cuivre est supérieur au potentiel de la lame de zinc, donc **la lame Cu est le pôle $\oplus$ de la pile** (ce qui est conforme à nos prévisions, puisque $E^0(\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}) = 0{,}34$ V et $E^0(\text{Zn}^{2+}/\text{Zn}) = -0{,}76$ V).

2° *a*) L'équation-bilan de la pile est :

$$\text{Zn} + \text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{Cu} \, .$$

Lorsque la pile débite, il y a consommation d'ions Cu^{2+} selon la demi-équation : $\text{Cu}^{2+} + 2\,\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$; il faut donc avoir une solution riche en ions Cu^{2+} et prendre une solution saturée de sulfate de cuivre.

b) En revanche, il y a production d'ions Zn^{2+} selon $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\,\text{e}^-$; il n'est donc pas nécessaire d'avoir une solution concentrée de sulfate de zinc.

3° La pile s'arrêtera de fonctionner lorsque tout le zinc sera consommé.

Cela représente une quantité n_{Zn} de zinc telle que $n_{\text{Zn}} = \dfrac{m}{M_{\text{Zn}}}$.

La demi-équation $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\,\text{e}^-$ montre que 1 mole de zinc libère 2 moles d'électrons.

La quantité n_{Zn} de zinc libérera une quantité d'électrons n_{e^-} telle que :

$$n_{\text{e}^-} = 2\,n_{\text{Zn}} = 2\,\frac{m}{M_{\text{Zn}}} \, ,$$

soit une quantité d'électricité : $q = 2 \, . \, \dfrac{m}{M_{\text{Zn}}} \, . \, \mathcal{F}$ ($1\ \mathcal{F} = 9{,}65 \, . \, 10^4$ C).

Comme $q = I \, . \, t$, on a $t = \dfrac{q}{I} = \dfrac{2\,m \, . \, \mathcal{F}}{M_{\text{Zn}} \, . \, I}$,

d'où $t = \dfrac{2 \times 15 \times 9{,}65 \, . \, 10^4}{63{,}4 \times 0{,}2} = 22{,}83 \, . \, 10^4$,

soit $t = 22{,}83 \, . \, 10^4\ \text{s} = \mathbf{63{,}42\ h}$.

18.10 1° • La masse de X diminue dans la pile (X, Cu), donc :

$$\text{X} \rightarrow \text{X}^{2+} + 2\,\text{e}^- \, .$$

X est donc un réducteur plus fort que Cu et constitue le pôle $\ominus$. Le pôle $\oplus$ est l'électrode en cuivre de cette pile.

À vide, cette pile (X, Cu) présente une d.d.p. de 1,25 V, sa f.e.m. est 1,25 V.

On a : $E = E^0(\mathrm{Cu^{2+}/Cu}) - E^0(\mathrm{X^{2+}/X})$,
donc $E^0(\mathrm{X^{2+}/X}) = E^0(\mathrm{Cu^{2+}/Cu}) - E = 0{,}34 - 1{,}25$,
soit $E^0(\mathrm{X^{2+}/X}) = \mathbf{-0{,}91\ V}$.

- Dans la pile $(\mathrm{X, Y})$, la concentration en $\mathrm{Y^{2+}}$ diminue, donc :

$$\mathrm{Y^{2+} + 2\,e^- \rightarrow Y}.$$

$\mathrm{Y^{2+}}$ est donc l'oxydant plus fort que $\mathrm{X^{2+}}$ et constitue le pôle ⊕ de la pile $(\mathrm{X, Y})$ dont la f.e.m. est $E' = 0{,}47$ V.

$E' = E^0(\mathrm{Y^{2+}/Y}) - E^0(\mathrm{X^{2+}/X})$,
d'où $E^0(\mathrm{Y^{2+}/Y}) = E' + E^0(\mathrm{X^{2+}/X}) = 0{,}47 + (-\ 0{,}91)$,
soit $E^0(\mathrm{Y^{2+}/Y}) = \mathbf{-0{,}44\ V}$.

2° Le tableau des potentiels standard d'oxydoréduction nous montre que le couple $\mathrm{Fe^{2+}/Fe}$ a pour potentiel rédox $E^0(\mathrm{Fe^{2+}/Fe}) = -0{,}44$ V.
Donc $\mathbf{Y^{2+}/Y}$ est le couple $\mathbf{Fe^{2+}/Fe}$.

19

NOMBRE D'OXYDATION

RÉSUMÉ DU COURS

Électronégativité

Définition : l'électronégativité d'un élément est la mesure de l'aptitude d'un atome de cet élément à capter un ou plusieurs électrons. Un élément est d'autant plus électronégatif qu'il est capable de capter un ou des électrons. Cette électronégativité peut être évaluée dans l'échelle de Pauling par un nombre compris entre 0,7 et 4.

Les éléments les plus électronégatifs sont situés en haut et à droite du tableau de la classification périodique (*exemples :* F, O...).

Les moins électronégatifs sont en bas et à gauche (*exemples :* Cs, Ba ...).

L'association d'éléments d'électronégativités très différentes donne des composés ioniques (*exemple :* $Na^+ + Cl^-$).

L'association d'éléments d'électronégativités proches donne des composés covalents à liaison polarisée (*exemple :* H – Cl) ; dans cette molécule, le chlore est plus électronégatif que l'hydrogène ; le doublet liant sera plus proche de l'atome de chlore que de l'atome d'hydrogène.

La liaison H – Cl est polarisée $\overset{+\delta}{H} \longrightarrow \overset{-\delta}{Cl}$ ($+\delta$ et $-\delta$ sont les charges portées par les deux atomes).

L'échange d'électrons n'a pas lieu dans une liaison polarisée, mais il a été « amorcé ».

Dans ce cadre, la réaction :

$$H_2 + Cl_2 \rightarrow 2\,HCl$$

fait partie de la famille des réactions d'oxydoréduction.

Généralisation de l'oxydoréduction

■ Une **oxydation** est une réaction au cours de laquelle un atome d'un élément voit **sa charge augmenter** ; il en est ainsi lorsque cet atome :

- cède un ou plusieurs électrons ;
- forme une liaison (polarisée) avec un atome d'un élément plus électronégatif que lui ;
- cesse d'être lié à un atome d'un élément moins électronégatif que lui.

■ Une **réduction** est une réaction au cours de laquelle un atome d'un élément voit **sa charge diminuer** ; il en est ainsi lorsque cet atome :

- gagne un ou plusieurs électrons,
- forme une liaison avec un atome d'un élément moins électronégatif que lui,
- cesse d'être lié à un atome d'un élément plus électronégatif que lui.

Nombre d'oxydation

Le nombre d'oxydation (n.o.) d'un élément dans une espèce chimique est un nombre algébrique, noté en chiffres romains, défini conventionnellement à partir des règles suivantes :

- **Règle 1** : dans les ions monoatomiques, le n.o. de l'élément est égal à la charge de l'ion exprimée en unité de charge élémentaire.

- **Règle 2** : dans les corps purs simples, le n.o. de cet élément est nul. Par exemple, dans H_2 et O_2, le n.o. de chacun des éléments H, O est égal à zéro.

- **Règle 3** : dans tous les composés usuels, le n.o. de l'élément hydrogène est $+\mathrm{I}$; le n.o. de l'élément oxygène est $-\mathrm{II}$.
Cas particulier : le n.o. de O dans H_2O_2 est $+\mathrm{I}$.

- **Règle 4** : la somme algébrique des n.o. des différents éléments présents dans une molécule est nulle.

- **Règle 5** : la somme algébrique des n.o. des éléments présents dans un ion monoatomique ou polyatomique est égale à la valeur algébrique de la charge de cet ion exprimée en unité de charge élémentaire.

Applications aux réactions d'oxydoréduction

■ Les n.o. permettent de déceler une réaction d'oxydoréduction. Une réaction d'oxydoréduction a lieu quand, au moins, un des éléments a son n.o. qui varie.

Un élément est oxydé lorsque son n.o. augmente. Il est réduit lorsque son n.o. diminue.

On considère alors un échange fictif d'électrons défini à partir de la détermination de la variation du n.o.

▨ Les n.o. permettent aussi d'écrire les équations-bilan d'oxydoréduction.
Il faut :

- définir les réactifs et les produits de la réaction ;
- définir les n.o. et leur variation pour les éléments concernés ;
- que le nombre d'électrons fictifs cédés soit égal au nombre d'électrons fictifs captés : **la somme des variations des n.o. doit être égale à zéro** ;
- respecter la conservation de tous les éléments ;
- respecter la conservation des charges électriques.

la somme des variations des n.o. doit être égale à zéro

DES EXERCICES ■

Utilisation des nombres d'oxydation

19.1 Nombre d'oxydation

1° Calculer le n.o. de l'élément azote N dans les entités suivantes : N_2 ; NO ; NO_2 ; NH_3 ; NH_4^+ ; NO_2^- ; NO_3^-.

2° Classer ces différentes entités selon l'ordre croissant du n.o. de l'élément azote.

19.2 Reconnaître une réaction d'oxydoréduction

Les réactions ci-dessous sont-elles des réactions rédox ? Justifier.

1° $NH_3 + HCl \rightarrow NH_4Cl$. **2°** $C + O_2 \rightarrow CO_2$.

3° $3\,Fe + 2\,O_2 \rightarrow Fe_3O_4$. **4°** $H^+ + OH^- \rightarrow H_2O$.

5° $Fe^{3+} + 3\,OH^- \rightarrow Fe(OH)_3$. **6°** $C + 2\,CuO \rightarrow CO_2 + 2\,Cu$.

Indication : Fe_3O_4 résulte de l'association de FeO et de Fe_2O_3.

19.3 Équilibrer des réactions

Équilibrer les équations-bilan des réactions d'oxydoréduction en indiquant chaque fois l'oxydant et le réducteur.

1° $CO_2 + Al \rightarrow C + Al_2O_3$.

2° $NH_3 + Cl_2 \rightarrow N_2 + HCl$.

3° $MgO + Cl_2 \rightarrow MgCl_2 + O_2$.

Bilan de quelques réactions d'oxydoréduction

19.4 Rôle oxydant de l'acide sulfurique concentré et chaud

L'acide sulfurique concentré et chaud réagit sur le carbone ; les produits de la réaction sont : le dioxyde de carbone, le dioxyde de soufre et l'eau (vapeur).

1° Écrire, sans l'équilibrer, l'équation-bilan.

2° Déterminer les n.o. du carbone et du soufre dans toutes les espèces chimiques où ils se trouvent.

3° Établir l'équation-bilan en l'équilibrant.

19.5 De l'aluminium aussi cher que de l'or !

Le premier procédé d'obtention du métal aluminium était très onéreux. Il conduisait à un prix du kilogramme d'aluminium fabriqué presque aussi élevé que le prix du kilogramme d'or.

Dans ce procédé, l'oxyde d'aluminium ou alumine (Al_2O_3) est attaqué par de l'acide chlorhydrique :

$$Al_2O_3 + 6HCl \rightarrow 2\,AlCl_3 + 3H_2O\,. \quad (1)$$

Le chlorure d'aluminium anhydre est ensuite traité par le sodium :

$$AlCl_3 + 3Na \rightarrow 3NaCl + Al\,. \quad (2)$$

1° La réaction (1) est-elle une réaction d'oxydoréduction ?

Donnée : le n.o. de l'élément Cl ne change pas au cours de la réaction.

2° La réaction (2) est-elle une réaction d'oxydoréduction ? Si oui, l'analyser en terme d'oxydoréduction à l'aide des n.o.

3° Quelle masse de sodium faut-il utiliser pour obtenir 1 kg d'aluminium ?

♦♦ 19.6 Grillage de la pyrite

1° La pyrite de fer a pour formule FeS_2 et contient des ions Fe^{2+}.

a) Quel est le n.o. de l'élément soufre ?

b) Quelle doit être l'entité constituée par l'élément soufre présente dans le cristal de pyrite afin que l'atome de soufre possède la structure du gaz rare qui le suit dans la classification périodique ?

2° Le grillage (action à haute température du dioxygène de l'air) de l'acier permet d'obtenir de l'oxyde de fer III et du dioxyde de soufre.

a) Écrire l'équation-bilan de cette réaction. Définir l'oxydant et le réducteur.

b) Calculer le volume V de dioxyde de soufre et la masse d'oxyde de fer III que l'on obtient avec 1 tonne de pyrite.

Donnée : le volume molaire du dioxyde de soufre est $V_m = 24{,}4\ L\,.\,mol^{-1}$.

3° L'oxyde de fer III est ensuite réduit par le monoxyde de carbone CO. On obtient du fer et du dioxyde de carbone.

a) Écrire l'équation-bilan de cette réaction.

b) Calculer la masse de fer obtenue.

♦ 19.7 Préparation du dichlore au laboratoire

Pour préparer du dichlore, on peut faire réagir de l'acide chlorhydrique sur du dioxyde de manganèse MnO_2.
On obtient des ions manganèse II (Mn^{2+}), de l'eau et du dichlore (Cl_2).

1° Quels sont les couples rédox qui interviennent ?

2° Écrire l'équation-bilan de cette réaction d'oxydoréduction.

3° On veut préparer 4 L de dichlore.

Quelle masse de dioxyde de manganèse faut-il utiliser avec de l'acide chlorhydrique en excès ?

Donnée : dans les conditions de l'expérience, le volume molaire du dichlore est $V_m = 24{,}4\ \text{L.mol}^{-1}$.

Une réaction d'oxydoréduction particulière

♦♦ 19.8 Dismutation de l'eau oxygénée ou peroxyde d'hydrogène

1° Dans le peroxyde d'hydrogène H_2O_2, de structure $H-O-O-H$, le n.o. de l'hydrogène est $+\text{I}$.

Calculer le n.o. de l'oxygène dans H_2O_2.

2° *a*) Calculer les n.o. de l'oxygène dans les différents corps mis en jeu dans la réaction :

$$H_2O_2 \rightarrow H_2O + \frac{1}{2}O_2. \quad (1)$$

b) Quel est le réducteur ? Quel est l'oxydant ?

3° *a*) Calculer le volume de dioxygène qui provient de la décomposition complète de 400 mL d'une eau oxygénée commerciale à $2{,}5\ \text{mol.L}^{-1}$.

Donnée : dans les conditions de l'expérience, le volume molaire est $V_m = 24\ \text{L.mol}^{-1}$.

b) Comparer le volume de dioxygène recueilli au volume d'eau oxygénée décomposée.

CORRIGÉS DES EXERCICES

19.1 1° • N_2 est un corps simple, donc : n.o. (N) = **0**.

• NO est une molécule dont la somme des n.o. des éléments doit être nulle (à l'élément O est attribué n.o. = – II), donc :

n.o. (N) + n.o. (O) = 0, d'où n.o. (N) = – n.o. (O) = **+ II**.

• Pour NO_2, on fait le même raisonnement :

n.o. (N) + 2 n.o. (O) = 0, d'où n.o. (N) = – 2 n.o. (OH) = **+ IV**.

• Pour NH_3 (à l'élément H est attribué n.o. = + I) :

n.o. (N) + 3 n.o. (H) = 0, d'où n.o. (N) = **– III**.

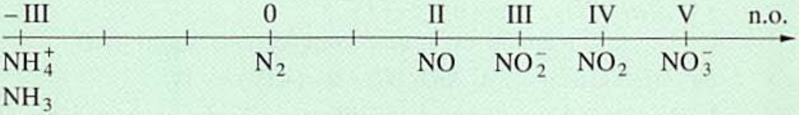
• Pour NH_4^+, la somme des n.o. doit être égale à la charge de l'ion :

n.o. (N) + 4 n.o. (H) = + I, d'où n.o. (N) + 4 (I) = + I,
soit n.o. (N) = **– III**.

• Pour NO_2^- : n.o. (N) = **+ III**.

• Pour NO_3^- : n.o. (N) = **+ V**.

2°



19.2 Pour chaque équation, il faut chercher les n.o. des éléments mis en jeu. S'il n'y a pas de variation des n.o., il ne s'agit pas d'oxydoréduction ; s'il y a variation des n.o., il s'agit d'une oxydoréduction.
Notons que le réducteur est l'entité contenant l'élément dont le n.o. augmente, l'oxydant est l'entité contenant l'élément dont le n.o. diminue.

$$\begin{array}{lccccccccc} 1^\circ & N & H_3 & + & H & Cl & \rightarrow & N & H_4 & Cl. \\ & \downarrow & \downarrow & & \downarrow & \downarrow & & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \text{n.o.} : \rightarrow & III & I & & I & -I & & III & I & -I \end{array}$$

Il n'y a aucune variation de n.o., **ce n'est pas une oxydoréduction**.

$$\begin{array}{lcccccc} 2^\circ & C & + & O_2 & \rightarrow & C & O_2. \\ & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & \downarrow \\ \text{n.o.} : \rightarrow & 0 & & 0 & & +IV & -II \end{array}$$

Variation des n.o. : **c'est une oxydoréduction** ; C est le réducteur et O_2 est l'oxydant.

$$\begin{array}{lcccc} 3^\circ & 3\,Fe & + & 2\,O_2 & \rightarrow Fe_3O_4. \\ & 0 & & 0 & \end{array}$$

Fe_3O_4 résulte de l'association de FeO et de Fe_2O_3.

$$\underset{+\mathrm{II}\;-\mathrm{II}}{\mathrm{Fe\;\;O}} + \underset{+\mathrm{III}\;-\mathrm{II}}{\mathrm{Fe_2\;O_3}}.$$

C'est une oxydoréduction : Fe est le réducteur et O_2 est l'oxydant.

4° $$\underset{+\mathrm{I}}{\mathrm{H^+}} + \underset{-\mathrm{II}\;+\mathrm{I}}{\mathrm{O\;\;H^-}} \to \underset{+\mathrm{I}\;-\mathrm{II}}{\mathrm{H_2\;\;O}}.$$

Ce n'est pas une oxydoréduction : une réaction acide-base n'est pas une réaction d'oxydoréduction.

5° $$\underset{+\mathrm{III}}{\mathrm{Fe^{3+}}} + 3\underset{-\mathrm{II}\;+\mathrm{I}}{\mathrm{O\;\;H^-}} \to \underset{+\mathrm{III}\;-\mathrm{II}\;+\mathrm{I}}{\mathrm{Fe\;\;(O\;\;H)_3}}.$$

Ce n'est pas une oxydoréduction.

6° $$\underset{0}{\mathrm{C}} + 2\underset{+\mathrm{II}\;-\mathrm{II}}{\mathrm{Cu\;\;O}} \to \underset{+\mathrm{IV}\;-\mathrm{II}}{\mathrm{C\;\;\;O_2}} + 2\underset{0}{\mathrm{Cu}}.$$

C'est une oxydoréduction : C est le réducteur et CuO est l'oxydant.

19.3 1° Étudions la réaction :

$$\mathrm{CO_2} + \mathrm{Al} \to \mathrm{C} + \mathrm{Al_2O_3}.$$

- C, dans CO_2, a pour n.o. : +IV.

C, dans le 2e membre, est un corps simple, donc n.o.(C) = 0.

Sa variation de n.o. est Δn.o.(C) = 0 − (+IV) = − IV.

L'élément carbone a son n.o. qui diminue ; il subit une réduction, CO_2 est un oxydant.

- L'oxygène étant lié à d'autres atomes, dans les deux membres, son n.o. ne change pas : n.o.(O) = − II.

- L'aluminium, dans le 1er membre, est un corps simple, donc n.o.(Al) = 0.

Dans Al_2O_3, le n.o. de l'aluminium est donné par la relation :

2 × n.o.(Al) + 3 × n.o.(O) = 0, d'où 2 × n.o.(Al) + 3 × (− II) = 0, soit n.o.(Al) = + III.

Méthode pour équilibrer l'équation d'oxydoréduction :

On écrit des équations d'oxydoréduction partielles en considérant uniquement l'élément qui participe à l'oxydation ou à la réduction et en équilibrant uniquement les nombres d'oxydation. On attribue à chaque électron un n.o. égal à − I :

$$\begin{array}{ll} \mathrm{CO_2} + 4e^- & \to \mathrm{C}.\\ \downarrow & \\ \underbrace{\mathrm{IV} + 4(-\mathrm{I})}_{\substack{\text{somme}\\ \text{des n.o.}=0}} & \quad \underbrace{0}_{\substack{\text{somme}\\ \text{des n.o.}=0}} \end{array}$$

Dans ce travail préliminaire, il n'est pas utile d'équilibrer les atomes d'oxygène dont le n.o. ne change pas.

De même :

$$\begin{array}{ccc} 2\,Al & \rightarrow & Al_2O_3 + 6\,e^- . \\ \downarrow & & \downarrow \\ \underbrace{2(0)}_{\text{somme des n.o.}=0} & & \underbrace{2(+III)\quad 6(-I)}_{\text{somme des n.o.}=0} \end{array}$$

Remarquer que les nombres d'atomes d'aluminium sont équilibrés (car c'est l'élément aluminium qui est oxydé).

Le nombre d'électrons cédés par le réducteur (qui est oxydé) doit être égal à celui gagné par l'oxydant (qui est réduit).

Les deux équations partielles doivent faire intervenir le même nombre d'électrons. La première équation doit être multipliée par 3 et la seconde par 2.

$$\begin{array}{ll} (\times 3) & CO_2 + 4\,e^- \rightarrow C \\ (\times 2) & \qquad 2\,Al \rightarrow Al_2O_3 + 6\,e^- . \end{array}$$

L'équation globale est obtenue en faisant la somme :

$$\mathbf{3\,CO_2 + 4\,Al \rightarrow 3\,C + 2\,Al_2O_3.}$$

On doit vérifier que les nombres d'atomes des éléments qui interviennent des deux côtés sont égaux.

Autre méthode : l'équation-bilan s'écrit :

réduction

Δn.o. = − IV

$$\overset{+IV}{x\,C}\,\underset{-II}{O_2} + y\,\underset{0}{Al} \rightarrow x'\overset{0}{C} + y'\,\underset{+III}{Al_2}\,\underset{-II}{O_3}.$$

oxydation

Δn.o. = + III

Pour déterminer les coefficients x et y, écrivons que la variation globale des n.o. est nulle entre l'état initial et l'état final :

$$x(-IV) + y(+III) = 0,\ \text{soit}\ -4x + 3y = 0,\ \text{d'où}\ \frac{x}{y} = \frac{3}{4}.$$

Une solution est $x = 3$ et $y = 4$.

D'où l'équation :

$$\mathbf{3\,CO_2 + 4\,Al \rightarrow 3\,C + 2\,Al_2O_3}.$$

2°

$$\begin{array}{ccccc} 2\,NH_3 & \rightarrow & N_2 & + & 6\,e^- . \\ 2(III) & & 0 & & 6(-I) \end{array}$$

$$\begin{array}{ccccc} Cl_2 & + & 2\,e^- & \rightarrow & 2\,HCl . \\ 0 & & 2(-I) & & 2(-I) \end{array}$$

En multipliant la deuxième équation partielle par 3, et en faisant la somme, on obtient :

$$\mathbf{2\,NH_3 + 3\,Cl_2 \rightarrow N_2 + 6\,HCl}.$$

L'équation est équilibrée pour les atomes.

3° • Équilibrons l'équation, et indiquons les n.o. des différents éléments.

$$\begin{array}{ccccccccc}
\mathrm{Mg} & \mathrm{O} & + & \mathrm{Cl_2} & \rightarrow & \mathrm{Mg} & \mathrm{Cl_2} & + & \mathrm{O_2}.\\
\downarrow & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & \downarrow & & \downarrow\\
-\mathrm{II} & +\mathrm{II} & & 0 & & -\mathrm{II} & -\mathrm{I} & & 0
\end{array}$$

Le n.o. de l'élément Mg ne varie pas. L'élément Mg n'est ni oxydé, ni réduit. L'oxygène est l'élément oxydant et le chlore l'élément réducteur.

• Écrivons l'équation partielle relative à l'oxydant O :

$$\begin{array}{ccccc}
2\,\mathrm{Mg}\;\mathrm{O} & + & 4\,e^- & \rightarrow & \mathrm{O_2}.\\
\downarrow & & & & \downarrow\\
2(+\mathrm{II}) & & 4(-\mathrm{I}) & & 0
\end{array}$$

• Écrivons l'équation partielle relative au chlore :

$$\begin{array}{ccccc}
\mathrm{Cl_2} & + & 2\,e^- & \rightarrow & \mathrm{MgCl_2}.\\
\downarrow & & & & \downarrow\\
0 & & 2(-\mathrm{I}) & & 2(-\mathrm{I})
\end{array}$$

Il faut multiplier la deuxième équation partielle par 2 :

$$\mathbf{2\,MgO + 2\,Cl_2 \rightarrow O_2 + 2\,MgCl_2}.$$

19.4 1° Équation-bilan non équilibrée :

$$\mathbf{H_2SO_4 + C \rightarrow CO_2 + SO_2 + H_2O}.$$

2° Calcul des n.o. du soufre :

■ Dans H_2SO_4 :

$2\,\text{n.o.}(\mathrm{H}) + \text{n.o.}(\mathrm{S}) + 4\,\text{n.o.}(\mathrm{O}) = 0$,

d'où $2(+\mathrm{I}) + \text{n.o.}(\mathrm{S}) + 4(-\mathrm{II}) = 0$,

soit $\text{n.o.}(\mathrm{S}) = \mathbf{+VI}$.

■ Dans SO_2 : $\text{n.o.}(\mathrm{S}) = \mathbf{+IV}$.

Calcul des n.o. du carbone :

• dans le 1^er^ membre, $\text{n.o.}(\mathrm{C}) = \mathbf{0}$;

• dans CO_2 :

$\text{n.o.}(\mathrm{C}) + 2\,\text{n.o.}(\mathrm{O}) = 0$,

d'où $\text{n.o.}(\mathrm{C}) + 2(-\mathrm{II}) = 0$,

soit $\text{n.o.}(\mathrm{C}) = \mathbf{+IV}$.

Les éléments oxygène et hydrogène ne sont ni oxydés ni réduits.

3° • Équation partielle pour l'élément oxydant, soufre :

$$\begin{array}{ccccc} \mathrm{H_2SO_4} & + & 2\,\mathrm{e}^- & \rightarrow & \mathrm{SO_2}\,. \\ \downarrow & & & & \downarrow \\ \mathrm{VI} & & 2(-\mathrm{I}) & & \mathrm{IV} \end{array}$$

• Équation partielle pour l'élément réducteur, carbone :

$$\begin{array}{ccccc} \mathrm{C} & \rightarrow & \mathrm{CO_2} & + & 4\,\mathrm{e}^-\,. \\ \downarrow & & \downarrow & & \\ 0 & & +\mathrm{IV} & & 4(-\mathrm{I}) \end{array}$$

• Il faut multiplier la première équation par 2 et faire la somme :

$$2\,\mathrm{H_2SO_4} + \mathrm{C} \rightarrow 2\,\mathrm{SO_2} + \mathrm{CO_2}\,.$$

• L'équation n'est pas équilibrée pour les atomes d'hydrogène. On ajoute 2 molécules d'eau dans le membre de droite :

$$\mathbf{2\,H_2SO_4 + C \rightarrow 2\,SO_2 + CO_2 + 2\,H_2O}\,.$$

On vérifie que l'équation est équilibrée pour les atomes d'oxygène.

19.5 1° Considérons la réaction (1) :

$$\mathrm{Al_2O_3} + 6\,\mathrm{HCl} \rightarrow 2\,\mathrm{AlCl_3} + 3\,\mathrm{H_2O}\,.$$

L'oxygène et l'hydrogène étant liés chacun à d'autres éléments, dans les deux membres, leur n.o. ne change pas.

■ n.o. de l'élément chlore :

• dans HCl, n.o.(Cl) = I.

Comme il n'y a pas de changement de n.o. de l'élément Cl :

• dans $\mathrm{AlCl_3}$, n.o.(Cl) = I.

■ Il en est de même pour l'élément Al dont le n.o. reste égal à + III dans $\mathrm{Al_2O_3}$ et $\mathrm{AlCl_3}$.

Conclusion : **cette réaction n'est pas une réaction d'oxydoréduction**.

2° Considérons la réaction (2) :

$$\mathrm{AlCl_3} + 3\,\mathrm{Na} \rightarrow 3\,\mathrm{NaCl} + \mathrm{Al}\,.$$

Si l'élément chlore a son n.o. qui ne change pas, pour Al dans $\mathrm{AlCl_3}$, son n.o. est égal à III et, dans le deuxième membre, son n.o. vaut 0. **Le chlorure d'aluminium qui contient l'élément Al est réduit ; c'est l'oxydant.** Quant à l'élément sodium, son n.o. passe de 0 dans le premier membre à + I dans le second membre. Le sodium est oxydé, c'est le réducteur.

3° La réaction (2) montre que 3 moles de sodium donnent 1 mole d'aluminium, soit, en quantité de matière :

$$n_{\mathrm{Na}} = 3n_{\mathrm{Al}}\,.$$

Or $n_{\mathrm{Al}} = \dfrac{m_{\mathrm{Al}}}{M_{\mathrm{Al}}}$, donc $n_{\mathrm{Na}} = \dfrac{3m_{\mathrm{Al}}}{M_{\mathrm{Al}}}$, et la masse m_{Na} de sodium nécessaire est :

$$m_{\text{Na}} = M_{\text{Na}} \cdot n_{\text{Na}} = \frac{3m_{\text{Al}} \cdot M_{\text{Na}}}{M_{\text{Al}}}, \text{ d'où } m_{\text{Na}} = \frac{3 \cdot 10^3 \times 23}{27} = 2\,555 \text{ g},$$

soit $m_{\text{Na}} \approx \mathbf{2{,}5\ kg}$.

19.6 **1°** *a*) Dans FeS_2, le n.o. du fer est : n.o.(Fe) = + II ; donc, pour l'élément soufre :

n.o.(Fe) + 2n.o.(S) = 0, d'où + II + 2n.o.(S) = 0, soit n.o.(S) = **– I**.

b) L'ion S^- ne possède que 7 électrons sur sa couche externe et n'est donc pas stable. Par contre, l'ion S_2^{2-} permet à chacun des atomes de soufre d'être entouré par quatre doublets d'électrons. La formule de Lewis peut s'écrire : $\left(|\overline{\underline{S}} - \overline{\underline{S}}| \right)^{2-}$.

2° *a*) Écrivons l'équation-bilan du grillage :

$$x\mathbf{FeS_2} + \mathbf{O_2} \rightarrow \mathbf{SO_2} + \mathbf{Fe_2O_3} \text{ (équation non équilibrée).}$$

Dans cette équation, les n.o. sont :

- élément fer dans FeS_2 : + II,
- élément soufre dans FeS_2 : – I,
- élément O dans O_2 : 0,
- élément S dans SO_2 : + IV,
- élément O dans SO_2 : – II,
- élément fer dans Fe_2O_3 : + III,
- élément O dans Fe_2O_3 : – II.

Une difficulté particulière apparaît : trois éléments Fe, S et O participent à l'oxydoréduction.

Écrivons les réactions partielles pour chacun d'eux :

$$Fe^{+II} \rightarrow Fe^{+III} + e^-$$

$$2\,S^{-I} \rightarrow 2\,S^{+IV} + 10\,e^-$$

(nous prenons $2\,S^{-I}$, car nous partons de FeS_2 comme réactif).

Donc : $Fe^{+II} + 2\,S^{-I} \rightarrow Fe^{+III} + 2\,S^{+IV} + 11\,e^-$. (1)

De même : $2\,O^0 + 4\,e^- \rightarrow 2\,O^{-II}$ (2)

(nous prenons $2\,O^0$, car nous partons de O_2 comme réactif).

Nous multiplions les coefficients de l'équation (1) par 4 et ceux de l'équation (2) par 11, puis nous faisons la somme :

$$4\,(Fe^{+II} + 2\,S^{-I}) + 22\,O^0 \rightarrow 4\,Fe^{+III} + 8\,S^{IV} + 22\,O^{-II}.$$

Écrivons les formules des réactifs et des produits :

$$4\,FeS_2 + 11\,O_2 \rightarrow 2\,Fe_2O_3 + 8\,SO_2.$$

L'oxydant est O_2 et le réducteur, FeS_2.

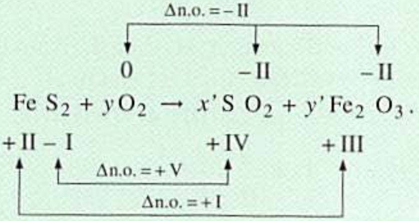
Remarques :

- Il ne faut pas confondre les écritures Fe^{+II} et Fe^{2+} :

Fe^{+II} n'a pas d'existence réelle ; cette notation représente l'élément fer de n.o.+ II ; Fe^{2+} représente l'ion fer II.

- Par ailleurs, l'écriture : $Fe^{+II} \rightarrow Fe^{+III} + e^-$ ne correspond pas à une réaction réelle, car les électrons n'apparaissent pas dans le milieu réactionnel. Il s'agit d'un artifice de calcul.

- Autre méthode :



$$Fe\,S_2 + y\,O_2 \rightarrow x'\,S\,O_2 + y'\,Fe_2\,O_3.$$

L'oxydant est le dioxygène O_2. Le réducteur est le disulfure de fer FeS_2.

Recherchons les coefficients x et y de l'équation-bilan en considérant que la variation globale des nombres d'oxydation est nulle entre l'état initial et l'état final :

$x \times (+\mathrm{I}) + x \times 2 \times (+\mathrm{V}) + y \times 2 \times (-\mathrm{II}) = 0$, soit $11x + (-4y) = 0$,

c'est-à-dire : $\dfrac{x}{y} = \dfrac{4}{11}$.

Une solution est $x = 4$ et $y = 11$.

D'où l'équation-bilan équilibrée :

$$\mathbf{4\,FeS_2 + 11\,O_2 \rightarrow 8\,SO_2 + 2\,Fe_2O_3}.$$

b) ■ L'équation-bilan :

$$4\,FeS_2 + 11\,O_2 \rightarrow 8\,SO_2 + Fe_2O_3$$

montre qu'au point de vue des quantités de matière, on doit avoir :

$$\frac{n_{(FeS_2)}}{4} = \frac{n_{O_2}}{11} = \frac{n_{SO_2}}{8} = \frac{n_{Fe_2O_3}}{2}.$$

Donc $n_{SO_2} = \dfrac{8}{4} n_{FeS_2} = 2n_{FeS_2}$, et $n_{Fe_2O_3} = \dfrac{2}{4} n_{FeS_2} = \dfrac{1}{2} n_{FeS_2}$.

■ Calculons n_{FeS_2} :

$M_{FeS_2} = 55{,}8 + 2 \times 32{,}1 = 120\ \mathrm{g\,.\,mol^{-1}}$ et $n_{FeS_2} = \dfrac{10^6}{120} = 8\,333\ \mathrm{mol}$.

Donc $n_{SO_2} = 16\,666\ \mathrm{mol}$, ce qui correspond à un volume de SO_2 :

$V_{SO_2} = 24{,}4 \times 16\,666 = 406{,}65\,.\,10^3\ \mathrm{L}$,

soit $V_{SO_2} = \mathbf{406{,}6\ m^3}$ et $n_{Fe_2O_3} = 4\,166\ \mathrm{mol}$.

Comme $M_{Fe_2O_3} = 55{,}8 \times 2 + 16 \times 3 = 159{,}6\ \mathrm{g\,.\,mol^{-1}}$, la masse m d'oxyde de fer III obtenue est :

$m = 159{,}6 \times 4\,166 = 664{,}9\,.\,10^3\ \mathrm{g}$, soit $m \approx \mathbf{665\ kg}$.

3° *a*) L'équation-bilan non équilibrée est :

oxydation
Δn.o. = + II

$$x\,\underset{+\text{III}}{\text{Fe}_2}\text{O}_3 + y\,\overset{+\text{II}}{\text{C}}\underset{-\text{II}}{\text{O}} \rightarrow x'\,\underset{0}{\text{Fe}} + y'\,\overset{+\text{IV}}{\text{C}}\underset{\mathbf{-II}}{\text{O}_2}.$$

réduction
Δn.o. = − III

Recherchons les coefficients x et y en écrivant que la variation globale des n.o. est nulle entre l'état initial et l'état final :

$$x \times 2(-\text{III}) + y(+\text{II}) = 0,$$

soit $-6x + 2y = 0$, d'où $\dfrac{x}{y} = \dfrac{2}{6} = \dfrac{1}{3}$.

Une solution est : $x = 1$ et $y = 3$.

D'où l'équation-bilan :

$$\mathbf{Fe_2O_3 + 3\,CO \rightarrow 2\,Fe + 3\,CO_2}. \quad (1)$$

b) On a : $n_{\text{F}_2\text{O}_3} = 4\,166$ mol.

L'équation-bilan (1) montre que : $\dfrac{n_{\text{Fe}_2\text{O}_3}}{1} = \dfrac{n_{\text{Fe}}}{2}$,

donc $n_{\text{Fe}} = 2n_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = 2 \times 4\,166$, d'où $n_{\text{Fe}} = 8\,332$ mol,

ce qui correspond à une masse : $m_{\text{Fe}} = M_{\text{Fe}} \cdot n_{\text{Fe}}$,

d'où $m_{\text{Fe}} = 55{,}8 \times 8\,332 = 465 \cdot 10^3$ g, soit $m_{\text{Fe}} = \mathbf{465\ kg}$.

19.7 1° Les couples rédox qui interviennent sont :

$$\mathbf{Cl_2/Cl^-} \text{ et } \mathbf{MnO_2/Mn^{2+}}.$$

2° L'équation-bilan non équilibrée est :

oxydation
Δn.o.(Cl) = I

$$\underset{+\text{IV}}{\text{Mn}}\text{O}_2 + \text{H}\overset{-\text{I}}{\text{Cl}} \rightarrow \overset{0}{\text{Cl}_2} + \underset{+\text{II}}{\text{Mn}^{2+}} + \text{H}_2\text{O}.$$

réduction
Δn.o.(Mn) = − II

Pour que la variation globale des n.o. soit nulle, il faut écrire :

$$\text{MnO}_2 + 2\,\text{HCl} \rightarrow \text{Cl}_2 + \text{Mn}^{2+} + \text{H}_2\text{O}.$$

Pour avoir la conservation des atomes d'oxygène, on écrit l'équation-bilan finale :

$$\mathbf{MnO_2 + 4\,HCl \rightarrow Cl_2 + Mn^{2+} + 2\,Cl^- + 2\,H_2O}\,. \quad (1)$$

3° L'équation (1) montre que les quantités de MnO_2 et de Cl_2 sont égales :

$n_{MnO_2} = n_{Cl_2}$, d'où $n_{Cl_2} = \dfrac{v}{V_m} = \dfrac{4}{24{,}4} = 0{,}164$ mol,

donc $n_{MnO_2} = 0{,}164$ mol.

Comme $M_{MnO_2} = 55 + 16 \times 2 = 87$ g,

$m_{MnO_2} = M_{MnO_2} \cdot n_{MnO_2}$, d'où $m_{MnO_2} = 87 \times 0{,}164 = 14{,}27$,

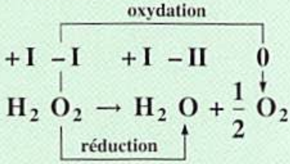
soit $\mathbf{m_{MnO_2} = 14{,}3\ g}$.

19.8 **1°** Le n.o.(H) = + I ; de la formule de la molécule H_2O_2, on tire :

2 n.o.(H) + 2 n.o.(O) = 0, d'où 2 × (I) + 2 n.o.(O) = 0,

soit n.o.(O) = **– I**.

2° *a*) Étudions la réaction suivante :



$$\overset{+\mathrm{I}}{H_2}\,\overset{-\mathrm{I}}{O_2} \rightarrow \overset{+\mathrm{I}}{H_2}\,\overset{-\mathrm{II}}{O} + \frac{1}{2}\,\overset{0}{O_2}$$

b) **L'eau oxygénée est à la fois réducteur et oxydant** : on dit que l'eau oxygénée subit une **dismutation**.

Plus généralement, on dit qu'il y a dismutation chaque fois qu'une substance est susceptible, au cours d'une réaction, de jouer à la fois le rôle d'oxydant et de réducteur.

3° *a*) La quantité de matière $n_{H_2O_2}$ dans 400 mL d'eau oxygénée est :

$$n_{H_2O_2} = 2{,}5 \times 0{,}4 = 1 \text{ mol}.$$

L'équation (1) montre que la quantité de matière de dioxygène obtenue est :

$n_{O_2} = \dfrac{1}{2} n_{H_2O_2}$, d'où $n_{O_2} = \dfrac{n_{H_2O_2}}{2} = 0{,}5$ mol,

ce qui représente un volume de dioxygène :

$V_{O_2} = 0{,}5 \times 24 = 12$, soit $\mathbf{V_{O_2} = 12\ L}$.

b) $\mathbf{V_{O_2} = 30\,V}$ **(eau oxygénée)**.

On dit qu'il s'agit d'une eau oxygénée à 30 volumes.

20

PILES, ACCUMULATEURS ET ÉLECTROLYSEURS

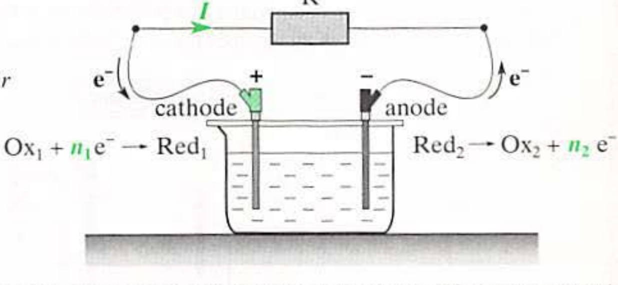
RÉSUMÉ DU COURS

Générateurs électrochimiques

■ **Piles et accumulateurs sont des générateurs électrochimiques.**

■ Un **générateur électrochimique** est un dispositif qui permet de convertir de l'énergie chimique en travail électrique, ou « énergie électrique », non stockable. La réaction chimique qui permet de réaliser cette conversion est une oxydoréduction. Le pôle positif du générateur est la cathode (réduction) ; le pôle négatif du générateur est l'anode (oxydation).

Réactions d'oxydoréduction dans un générateur électrochimique.



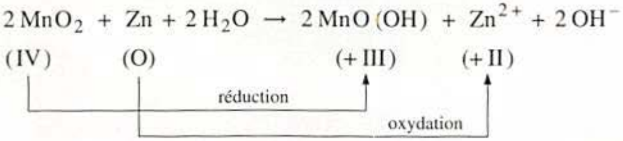
R
I
e^-
e^-
+
−
cathode
anode
$Ox_1 + n_1 e^- \rightarrow Red_1$
$Red_2 \rightarrow Ox_2 + n_2 e^-$

Après une première décharge au cours de laquelle l'un des réactifs est consommé, une pile est inutilisable. En revanche, **un accumulateur peut être rechargé**.

Une **pile Leclanché** est constituée par une anode en zinc (réducteur), une cathode en graphite en contact avec du dioxyde de manganèse (oxydant) et un électrolyte, mélange de chlorure de zinc et de chlorure d'ammonium fixé dans un gel. Sa force électromotrice, ou f.e.m., est de 1,5 V.

Les couples d'oxydoréduction mis en jeu sont Zn^{2+}/Zn et $MnO_2/MnO(OH)$.

Lorsque la pile débite, l'équation-bilan de la réaction est :

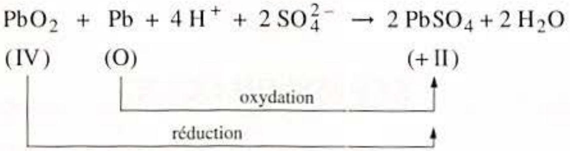


$$2\,MnO_2 + Zn + 2\,H_2O \rightarrow 2\,MnO(OH) + Zn^{2+} + 2\,OH^-$$

(IV)
(O)
(+ III)
(+ II)
réduction
oxydation

Un **accumulateur au plomb** est constitué par une anode en plomb (réducteur), une cathode en plomb recouverte de dioxyde de plomb (oxydant) et un électrolyte, l'acide sulfurique. La f.e.m. d'un élément est de 2,1 V. Une batterie comportant six éléments d'accumulateurs au plomb a une f.e.m. voisine de 13 V.

- Les couples d'oxydoréduction mis en jeu sont Pb/Pb^{2+} et PbO_2/Pb^{2+} en milieu sulfurique $(2H^+ + SO_4^{2-})$.
- Lorsque l'accumulateur débite, l'équation-bilan de la réaction est :



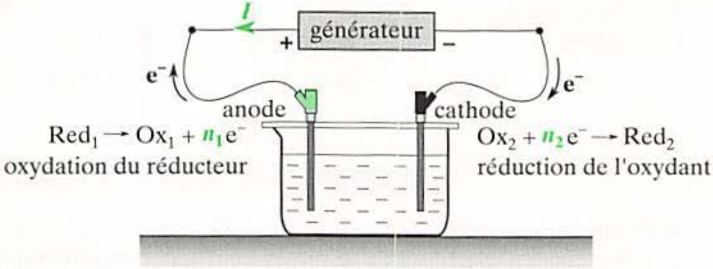
$$PbO_2 + Pb + 4\,H^+ + 2\,SO_4^{2-} \rightarrow 2\,PbSO_4 + 2\,H_2O$$

(IV)
(O)
(+ II)
oxydation
réduction

- La concentration de l'électrolyte en ions SO_4^{2-} diminue au cours de la décharge de l'accumulateur.

Électrolyse

Une **électrolyse** est une réaction d'oxydoréduction forcée. C'est une réaction endo-énergétique : l'énergie nécessaire est fournie par le générateur associé à l'électrolyseur. Celui-ci convertit une partie du travail électrique reçu en énergie chimique ; l'autre partie est dissipée par effet joule (transfert sous forme de chaleur).



I
générateur
+
–
e⁻
e⁻
anode
cathode
Red₁ → Ox₁ + n₁e⁻
oxydation du réducteur
Ox₂ + n₂e⁻ → Red₂
réduction de l'oxydant

🟩 Au cours d'une électrolyse, il se produit (*cf.* la figure précédente) :

- une oxydation à la surface de l'anode (borne d'entrée du courant électrique de l'électrolyseur) ;
- une réduction à la surface de la cathode (borne de sortie du courant électrique).

L'**oxydation anodique** peut être l'oxydation :

- d'anions contenus dans la solution ;
- des molécules d'eau (solvant) ;
- du métal constituant l'électrode (anode soluble).

La **réduction cathodique** peut être la réduction :

- des cations contenus dans la solution ;
- des molécules d'eau (solvant).

🟩 À partir des potentiels d'oxydoréduction des couples concernés, il est possible de prévoir les réactions sur les électrodes.

En général :

- parmi les substances oxydables, celle dont le potentiel d'oxydoréduction est le moins élevé est d'abord oxydée à l'anode ;
- parmi les substances réductibles, celle dont le potentiel d'oxydoréduction est le plus élevé est d'abord réduite à la cathode.

🟩 Lorsque des dégagements gazeux peuvent se produire sur les électrodes, l'existence de **surtensions** explique que les faits expérimentaux ne confirment pas les prévisions théoriques. Ces surtensions, liées à la vitesse de formation des produits à l'état gazeux, dépendent de la nature et de l'état de surface des électrodes.

🟩 Pendant la charge d'un accumulateur, une électrolyse se produit. Pour recharger l'accumulateur, on le monte en opposition avec un générateur auxiliaire (chargeur) qui impose le sens du courant dans le circuit : le dioxyde de plomb se reforme sur le pôle positif et le plomb se dépose sur le pôle négatif. L'équation-bilan de la réaction produite par l'électrolyse s'écrit :

$$2\,PbSO_4 + 2\,H_2O \rightarrow PbO_2 + Pb + 4\,H^+ + 2\,SO_4^{2-}.$$

La concentration de l'électrolyte en ions SO_4^{2-} augmente en cours de charge. Lorsque l'accumulateur est chargé, il se produit l'électrolyse de l'eau qui donne un dégagement de dioxygène sur le pôle positif et un dégagement de dihydrogène sur le pôle négatif.

Piles

20.1 Pile Leclanché

Une pile Leclanché a une f.e.m. $E = 1{,}52\ \text{V}$. Elle est montée en série avec une résistance $R = 100\ \Omega$. La tension à ses bornes vaut $1{,}26\ \text{V}$.

1° Faire un schéma simplifié et légendé de la pile Leclanché.
Indiquer les pôles.

2° Représenter le schéma du montage. Indiquer le sens du courant.

3° *a*) Calculer l'intensité du courant.

b) Déterminer la résistance interne de la pile.

c) Évaluer le rendement de la conversion d'énergie réalisée par la pile en fonctionnement.

4° La pile fonctionne pendant une durée totale de 1 038 h dans les conditions indiquées.

a) Calculer la quantité d'électricité mise en jeu.

b) Écrire la demi-équation de la réaction ayant lieu à l'anode de la pile.

c) Déterminer la masse de zinc ayant été consommée pendant la durée indiquée.

Données : $1\ \mathcal{F} = 96\,500\ \text{C}$; $M_{\text{Zn}} = 65{,}4\ \text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

20.2 Pouvoir énergétique massique théorique d'une pile Leclanché

1° Écrire la demi-équation de l'oxydation anodique dans une pile Leclanché.

2° Évaluer la quantité d'électricité mise en jeu lors de l'oxydation d'une masse de zinc égale à 1 kg.

3° Faire l'hypothèse que cette quantité d'électricité est mise en circulation sous une tension égale à la f.e.m. de la pile, soit $E = 1{,}5\ \text{V}$.
Calculer l'énergie mise en jeu au cours de la conversion, en kilowattheure par kilogramme de zinc.

Données : $1\ \mathcal{F} = 96\,500\ \text{C}$; $M_{\text{Zn}} = 65{,}4\ \text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

20.3 Pile au lithium

Une pile pour stimulateur cardiaque comporte une anode en lithium. La cathode est un fil d'argent en contact avec un sel d'argent (I). L'électrolyte est constitué par un solvant organique anhydre et un sel de lithium.

1° Écrire la demi-équation électronique de la réaction ayant lieu :

a) à l'anode ;

b) sur la cathode, sachant que la masse du fil d'argent croît au cours du fonctionnement.

2° L'étude en laboratoire montre que si la pile fournit un courant d'intensité $20\ \mu A$, sa force électromotrice reste voisine de $3{,}1\ V$ pendant une durée de l'ordre de trois ans.

a) Calculer la quantité d'électricité mise en jeu durant ces trois ans.

b) Déterminer :

- la masse de lithium consommé ;
- l'augmentation de masse de l'électrode d'argent.

3° Rechercher la raison pour laquelle l'électrolyte est constitué par un solvant organique anhydre.

Données : $M_{Li} = 6{,}94\ g \cdot mol^{-1}$; $M_{Ag} = 107{,}9\ g \cdot mol^{-1}$; $1\ \mathcal{F} = 96\,500\ C$.

Accumulateurs au plomb

♦ **20.4** Un accumulateur au plomb contient $1{,}6\ L$ d'électrolyte. La masse volumique moyenne de l'électrolyte est $\rho = 1{,}23\ kg \cdot dm^{-3}$ à $20\ °C$ lorsque l'accumulateur est chargé à $100\ \%$ de sa capacité.

Pour préparer l'électrolyte, on dissout $1\ L$ de solution d'acide sulfurique à $96\ \%$ en masse dans $3{,}8\ L$ d'eau distillée.

Données : masse volumique de l'acide sulfurique à 96 % $= 1{,}83\ kg \cdot dm^{-3}$; masse volumique de l'eau $= 1{,}00\ kg \cdot dm^{-3}$.

1° Quels sont les couples d'oxydoréduction mis en jeu dans ce type d'accumulateur ?

2° *a*) Calculer la masse de la solution obtenue par mélange de $1\ L$ de solution sulfurique à $96\ \%$ et de $3{,}8\ L$ d'eau distillée.

b) Calculer son volume.

c) Quel est le phénomène constaté, en lisant ces données, lors de la dissolution de l'acide sulfurique dans l'eau ?

3° Déterminer :

a) la masse d'acide sulfurique pur contenu dans $1{,}6\ L$ d'électrolyte préparé ;

b) la quantité d'acide sulfurique mis en solution.

Donnée : masse molaire M de l'acide sulfurique : $M = 98\ g \cdot mol^{-1}$.

♦ **20.5** Un accumulateur au plomb contient 1,6 L d'électrolyte. Quand il est chargé, la masse volumique de l'électrolyte est $\rho_0 = 1{,}28\ \text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$; la concentration massique en acide sulfurique est alors de 38 %.

1° Calculer :

a) la masse d'acide sulfurique en solution ;

b) la quantité d'acide sulfurique correspondante.

2° Quand l'accumulateur est considéré comme à demi-déchargé, la masse volumique de l'électrolyte est $\rho_1 = 1{,}16\ \text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$; sa concentration massique en acide sulfurique est de 24 %.

a) Effectuer les mêmes calculs qu'à la question **1°** en faisant l'hypothèse que le volume d'électrolyte n'a pas varié.

b) Expliquer la raison de la diminution de la quantité d'acide sulfurique en solution.

3° *a*) Écrire les demi-équations électroniques des réactions sur les électrodes et l'équation-bilan lors du débit de l'accumulateur.

b) Déterminer la quantité d'acide sulfurique ayant disparu de la solution.

c) Évaluer la masse de sulfate de plomb (II) formé et indiquer si celui-ci est en solution ou sous forme de précipité au fond du bac.

d) Évaluer la quantité d'électricité en coulomb et en ampère-heure ayant été mise en circulation par l'accumulateur.

Données :
$M_{H_2SO_4} = 98\ \text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$; $M_{PbSO_4} = 303{,}3\ \text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$; $1\ \mathcal{F} = 96\,500\ \text{C}$.

Électrolyses

♦♦ 20.6 Électrolyse d'une solution de bromure de cuivre

On réalise l'électrolyse d'une solution aqueuse de bromure de cuivre dans un tube en U, avec des électrodes de platine poli.

1° Représenter un schéma du montage utilisé comportant un voltmètre pour mesurer la tension aux bornes de l'électrolyseur et un ampèremètre pour mesurer l'intensité du courant.

2° Les potentiels standard d'oxydoréduction des couples en présence sont :
$E^0(O_2/H_2O) = +\,1{,}23\ \text{V}$; $E^0(Br_2/Br^-) = +\,1{,}08\ \text{V}$;
$E^0(Cu^{2+}/Cu) = +\,0{,}34\ \text{V}$; $E^0(H^+/H_2) = 0{,}00\ \text{V}$.

a) Quelles sont les réactions possibles sur les électrodes ?

b) À partir de quelle valeur de la tension U_{AK} entre anode et cathode observe-t-on ces réactions ?

c) Décrire les observations faites lorsque l'électrolyse a lieu.

3° Avec l'électrolyseur utilisé, lorsque la tension U_{AK} vaut $3{,}2\ \mathrm{V}$, l'intensité du courant est $I = 80\ \mathrm{mA}$.
Déterminer la masse de cuivre déposée sur la cathode au bout d'une heure de fonctionnement.

Données : $1\ \mathcal{F} = 96\,500\ \mathrm{C}$; $M_{\mathrm{Cu}} = 63{,}5\ \mathrm{g\,.\,mol^{-1}}$.

♦♦ 20.7 Électrolyse d'un mélange de nitrates

On réalise l'électrolyse d'une solution aqueuse contenant du nitrate d'argent et du nitrate de cuivre dans un électrolyseur à électrodes de platine.

Les potentiels standard des couples en présence sont :
$E^0(NO_3^-/NO) = +0{,}96\ \mathrm{V}$; $E^0(O_2/H_2O) = +1{,}23\ \mathrm{V}$;
$E^0(Ag^+/Ag) = +0{,}80\ \mathrm{V}$; $E^0(Cu^{2+}/Cu) = +0{,}34\ \mathrm{V}$;
$E^0(H^+/H_2) = 0{,}00\ \mathrm{V}$.

1° Il se produit un phénomène de surtension sur l'anode : le potentiel de l'anode doit être augmenté de $0{,}5\ \mathrm{V}$ par rapport à la valeur théorique. Entre quelles valeurs faut-il maintenir la tension U_{AK} entre l'anode et la cathode de l'électrolyseur, si on ne veut recueillir qu'un seul métal sur la cathode ?

2° *a*) Indiquer la nature du métal qui se dépose lorsque $U_{AK} = 1{,}1\ \mathrm{V}$.

b) Écrire l'équation de la réaction ayant lieu sur la cathode dans ces conditions.

♦♦ 20.8 Obtention du dichlore

Un électrolyseur est constitué par un tube en U et deux électrodes de charbon. Il contient une solution aqueuse de chlorure de sodium dont le pH vaut 7. Les potentiels d'oxydoréduction sont alors :

$E(H^+/H_2) = -0{,}42\ \mathrm{V}$; $E(O_2/H_2O) = +0{,}81\ \mathrm{V}$;

$E(Cl_2/Cl^-) = +1{,}36\ \mathrm{V}$; $E(Na^+/Na) = -2{,}71\ \mathrm{V}$.

La tension entre anode et cathode est maintenue à $1{,}85\ \mathrm{V}$. L'expérience montre qu'il y a des dégagements gazeux sur les électrodes. De l'indigo est décoloré dans le compartiment anodique. Une goutte de phénolphtaléine versée dans le compartiment cathodique donne une teinte rose violacé.

1° *a*) Quel est le gaz formé sur l'anode ?

b) Cette formation est-elle prévisible à partir des potentiels d'oxydoréduction ?

c) Quel est le phénomène qui permet d'expliquer ce fait expérimental ?

2° *a*) Écrire l'équation de la réaction ayant lieu sur la cathode.

b) Justifier la teinte observée en présence de phénolphtaléine.

♦ 20.9 Recharge d'un accumulateur au plomb

Pour recharger une batterie d'accumulateurs au plomb, on utilise un chargeur qui fait circuler un courant d'intensité $I = 50$ A pendant 1 h.

1° Schématiser le montage.

2° Indiquer la réaction ayant lieu :

a) sur l'anode ;

b) sur la cathode.

3° Calculer la quantité d'électricité ayant circulé pendant la charge.

4° Déterminer, pour chaque accumulateur :

a) la masse de plomb déposé sur sa cathode ;

b) la masse de dioxyde de plomb formé sur son anode ;

c) la quantité d'acide sulfurique remise en solution dans son bac.

5° Évaluer :

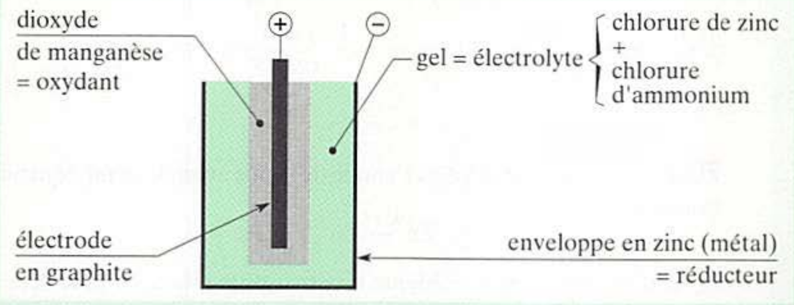
a) l'énergie fournie à la batterie, sachant que la valeur moyenne de la tension aux bornes de la batterie est égale à 13,2 V ;

b) l'énergie chimique emmagasinée, sachant que la résistance interne de la batterie est $r = 20\ \text{m}\Omega$;

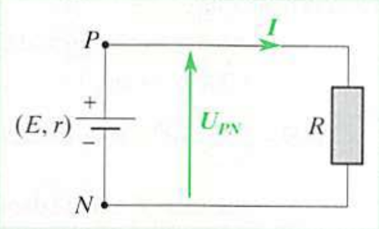
c) le rendement de cette conversion d'énergie.

Données : $M_{\text{Pb}} = 207{,}2\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $M_{\text{O}} = 16\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

20.1 1°


dioxyde de manganèse = oxydant
+
−
gel = électrolyte
chlorure de zinc + chlorure d'ammonium
électrode en graphite
enveloppe en zinc (métal) = réducteur

2°



3° *a*) Aux bornes du conducteur ohmique :

$$U_{PN} = R\,.\,I, \text{ donc } I = \frac{U_{PN}}{R}, \text{ d'où } I = \frac{1{,}26}{100} = 0{,}012\,6 \text{ A},$$

soit $\boldsymbol{I \approx 13}$ **mA**.

b) Aux bornes de la pile :

$$U_{PN} = -r\,.\,I + E, \text{ donc } r = \frac{E - U_{PN}}{I}, \text{ d'où } r = \frac{1{,}52 - 1{,}26}{0{,}012\,6} \approx 20{,}63\ \Omega,$$

soit $\boldsymbol{r \approx 20{,}6\ \Omega}$.

c) Le rendement de la conversion est :

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_\text{E}}{\mathcal{P}_\text{Ch}} = \frac{U_{PN}\,.\,I}{E\,.\,I} = \frac{U_{PN}}{E}, \text{ d'où } \eta = \frac{1{,}26}{1{,}52} \approx 0{,}828\,9,$$

soit $\boldsymbol{\eta \approx 83\ \%}$.

4° *a*) La quantité d'électricité mise en jeu est $q = I\,.\,\Delta t$.

$q = 0{,}012\,6 \times 1\,038 \approx 13{,}08$ A . h, c'est-à-dire $\boldsymbol{q \approx 13{,}1}$ **A . h**, ou **47,1 kC**.

b) Une oxydation se produit à l'anode, soit une perte d'électrons. L'espèce réductrice est le zinc. La demi-équation électronique est :

$$\mathbf{Zn \rightarrow 2\,e^- + Zn^{2+}}.$$

c) La quantité n de zinc oxydé est reliée à la quantité q d'électricité mise en jeu par l'égalité $n = \dfrac{q}{2\mathcal{F}}$.

La masse de zinc consommée est $m = n \,.\, M_{\mathrm{Zn}}$,

donc $m = \dfrac{q}{2\mathcal{F}} \,.\, M_{\mathrm{Zn}}$, d'où $m = \dfrac{47{,}1 \,.\, 10^3}{2 \times 96\,500} \times 65{,}4 = 15{,}953$,

soit $\boldsymbol{m \approx 16\ \mathrm{g}}$.

20.2 1° Le zinc est oxydé à l'anode de la pile selon la demi-équation électronique :

$$\mathrm{Zn} \rightarrow \mathrm{Zn}^{2+} + 2\,\mathrm{e}^-.$$

2° La demi-équation précédente montre qu'une mole de zinc nécessite la mise en circulation de deux moles d'électrons, soit deux faradays.

Exprimons la proportionnalité :

$$65{,}4\ \mathrm{g} \rightarrow 2 \times 96\,500\ \mathrm{C}$$
$$1\,000\ \mathrm{g} \rightarrow q(\mathrm{C}).$$

$$q = \frac{2 \times 96\,500}{65{,}4} \times 1\,000 = 2{,}95 \,.\, 10^6, \text{ soit } \boldsymbol{q \approx 2{,}95\ \mathrm{MC}}.$$

3° Lorsqu'un courant d'intensité I circule dans un dipôle sous la tension U, la puissance électrique $\mathcal{P}_{\mathrm{E}}$ mise en jeu est $\mathcal{P}_{\mathrm{E}} = U \,.\, I$.

En régime stationnaire, l'énergie fournie est $W_{\mathrm{E}} = \mathcal{P}_{\mathrm{E}} \,.\, \Delta t$ pendant une durée Δt, soit $W_{\mathrm{E}} = U \,.\, I \,.\, \Delta t = U \,.\, q$.

Dans ce cas, $W_{\mathrm{E}} = 1{,}5 \times 2{,}95 \,.\, 10^6$, soit $\boldsymbol{W_{\mathrm{E}} \approx 4{,}43\ \mathrm{MJ}}$.

Comme $1\ \mathrm{kW} \,.\, \mathrm{h}^{-1} \triangleq 3{,}6\ \mathrm{MJ}$, $\boldsymbol{W_{\mathrm{E}} \approx 1{,}23\ \mathrm{kW} \,.\, \mathrm{h}^{-1} \,.\, \mathrm{kg}^{-1}}$.

20.3 1° Les demi-équations des réactions sont :

a) **sur l'anode**, une oxydation du lithium (1^{re} colonne de la classification périodique des éléments) ; donc :

$$\mathbf{Li \rightarrow Li^+ + e^-}.$$

b) **sur la cathode**, une réduction avec dépôt d'argent, donc :

$$\mathbf{Ag^+ + e^- \rightarrow Ag}.$$

2° *a*) La quantité d'électricité ayant circulé est donnée par la relation :

$$q = I \,.\, \Delta t.$$

Or $I = 20\ \mu\mathrm{A}$ ou $20 \,.\, 10^{-6}\ \mathrm{A}$ et $\Delta t = 3 \times 365{,}25 \times 86\,400 \approx 94{,}673 \,.\, 10^6\ \mathrm{s}$.

D'où $q = 20 \,.\, 10^{-6} \times 94{,}673 \,.\, 10^6$, soit $\boldsymbol{q \approx 1{,}89\ \mathrm{kC}}$.

b) • La première demi-équation montre que l'oxydation d'une mole de lithium met en jeu une mole d'électrons, soit 96 500 C.

La quantité de lithium oxydé est donc $n_{\text{Li}}=\dfrac{q}{96\,500}$ et la masse de lithium est $m_{\text{Li}}=n_{\text{Li}}\,.\,M_{\text{Li}}$,

d'où $m_{\text{Li}}=\dfrac{1{,}893\,.\,10^3}{96{,}5\,.\,10^3}\times 6{,}94$, soit $\boldsymbol{m_{\text{Li}}\approx 0{,}136\ \text{g}}$.

• La deuxième demi-équation montre que $n_{\text{Ag}}=\dfrac{q}{96\,500}=n_{\text{Li}}$.

Or $m_{\text{Ag}}=n\,.\,M_{\text{Ag}}$, d'où $m_{\text{Ag}}=\dfrac{1{,}893\,.\,10^3}{96{,}5\,.\,10^3}\times 107{,}9$, soit $\boldsymbol{m_{\text{Ag}}\approx 2{,}12\ \text{g}}$.

3° Le lithium étant très réducteur ($E^0=-3{,}04$ V), **il réagit spontanément avec l'eau comme le fait le sodium**.

20.4 **1°** Dans un accumulateur au plomb, les couples d'oxydoréduction sont : **Pb^{2+}/Pb à l'anode** (pôle négatif) ; **PbO_2/Pb^{2+} à la cathode** (pôle positif).

2° *a*) La masse de solution obtenue est :
$m=1{,}83\times 1+1{,}00\times 3{,}8$, soit $\boldsymbol{m=5{,}63\ \text{kg}}$.

b) La masse volumique de la solution est $\rho=1{,}23\ \text{kg}\,.\,\text{dm}^{-3}$.
Par définition :

$\rho=\dfrac{m}{v}$, donc $v=\dfrac{m}{\rho}$, d'où $v=\dfrac{5{,}63}{1{,}23}=4{,}577$, soit $\boldsymbol{v\approx 4{,}6\ \text{dm}^3}$ **ou L**.

c) On a mélangé deux liquides de volumes respectifs $v_1=1$ L et $v_2=3{,}8$ L. Le volume final est $v\approx 4{,}6$ L, alors que $v_1+v_2=4{,}8$ L. Il y a une diminution de volume : c'est le phénomène de **contraction volumique** qui résulte des liaisons établies entre les molécules d'acide sulfurique H_2SO_4 et d'eau H_2O.
Un autre phénomène accompagne la dissolution d'acide dans l'eau, c'est une **élévation de température**.

3° *a*) Dans 1 L de solution à 96 % d'acide sulfurique, il y a :

$1{,}83\times 0{,}96\approx 1{,}76$ kg d'acide sulfurique pur.

On prépare 4,6 dm^3 de solution sulfurique ($\rho=1{,}23\ \text{kg}\,.\,\text{dm}^{-3}$), dont 1,6 L est utilisé dans l'accumulateur.

La masse d'acide sulfurique est $1{,}76\times\dfrac{1{,}6}{4{,}6}=\boldsymbol{0{,}612\ \text{kg}}$.

b) La quantité d'acide sulfurique est :

$n=\dfrac{m}{M}$, d'où $n=\dfrac{0{,}612}{0{,}098}\approx 6{,}246$ mol, soit $\boldsymbol{n\approx 6{,}25\ \text{mol}}$.

20.5 1° *a*) La masse d'acide sulfurique en solution est :

$m_0 = 1{,}28 \times 1{,}6 \times \frac{38}{100}$, soit $m_0 \approx 0{,}778$ kg, ou **778 g**.

b) La quantité d'acide sulfurique correspondante est :

$n_0 = \frac{778}{98}$, soit $n_0 \approx$ **7,94 mol**.

2° *a*) • Masse d'acide : $m_1 = 1{,}16 \times 1{,}6 \times \frac{24}{100}$,
soit $m_1 \approx 0{,}445$ kg, ou **445 g**.

• Quantité d'acide : $n_1 = \frac{445}{98}$, soit $n_1 \approx$ **4,5 mol**.

b) La quantité d'acide sulfurique en solution diminue, car **la réaction d'oxydoréduction fournissant l'énergie nécessaire au fonctionnement de l'accumulateur produit des ions Pb^{2+}**.
Ils précipitent en présence des ions sulfate SO_4^{2-} :

$$Pb^{2+} + SO_4^{2-} \rightarrow \underset{\downarrow}{\underline{PbSO_4}}.$$

3° *a*) • **Sur l'anode**, oxydation du plomb Pb :

$$\mathbf{Pb \rightarrow Pb^{2+} + 2\,e^-}.$$

• **Sur la cathode**, réduction du dioxyde de plomb PbO_2 en milieu acide :

$$\mathbf{PbO_2 + 2\,e^- + 4\,H^+ \rightarrow Pb^{2+} + 2\,H_2O}.$$

Du fait de la précipitation du sulfate de plomb en présence des ions sulfate SO_4^{2-}, l'équation-bilan est :

$$\mathbf{Pb + PbO_2 + 4\,H^+ + 2\,SO_4^{2-} \rightarrow 2\,PbSO_4 + 2\,H_2O}.$$

b) La quantité d'acide sulfurique ayant disparu de la solution est :

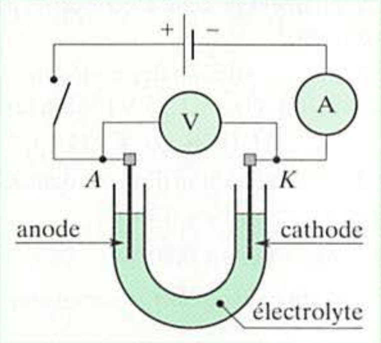
$$n_0 - n_1 = 7{,}94 - 4{,}54 = \mathbf{3{,}4\ mol}.$$

c) L'équation-bilan montre que lorsque 2 moles de H_2SO_4 disparaissent, il se forme 2 moles de $PbSO_4$. Il s'est donc formé 3,4 moles de sulfate de plomb, soit une masse $m = 3{,}4 \times 303{,}3 = 1\,031{,}2$, d'où $\boldsymbol{m} \approx$ **1 031 g**. Le sulfate de plomb étant très peu soluble dans l'eau, il précipite au fond du bac.

d) Les demi-équations électroniques montrent que la formation de 2 moles d'ions Pb^{2+} nécessite la circulation de 2 moles d'électrons. La quantité d'électrons ayant circulé est donc $n_{e^-} = 3{,}4$ mol. La quantité d'électricité est donc égale à $q = 3{,}4 \times 96\,500 = 328\,100$, soit $\boldsymbol{q} \approx$ **328 kC**.

Comme 1 A . h = 3 600 C, $q = \frac{328\,100}{3\,600} = 91{,}14$, soit $\boldsymbol{q} \approx$ **91,1 A . h**.

20.6 1° **Schéma de montage** :



2° *a*) Dans les deux couples rédox présents dans l'électrolyte, il existe des réducteurs (Br^- et H_2O) et des oxydants (H^+ et Cu^{2+}).

- C'est le réducteur du couple dont le potentiel d'oxydoréduction est le moins élevé qui est d'abord oxydé à l'anode.

Ainsi, sur l'anode ce sont les ions bromure Br^- :

$$\mathbf{2Br^- \rightarrow Br_2 + 2\,e^-}, \quad \text{car} \quad E^0(Br_2/Br^-) < E^0(O_2/H_2O).$$

- Sur la cathode, c'est l'oxydant du couple dont le potentiel d'oxydoréduction est le plus élevé qui est réduit, soit les ions cuivre II Cu^{2+} :

$$\mathbf{Cu^{2+} + 2\,e^- \rightarrow Cu}, \quad \text{car} \quad E^0(Cu^{2+}/Cu) > E^0(H_2O/H_2).$$

Remarque : le couple H^+/H_2 ($2\,H^+ + 2\,e^- \rightarrow H_2$; $E^0 = 0{,}00$ V) équivaut au couple H_2O/H_2 ($H_2O + 2\,e^- \rightarrow H_2 + 2\,OH^-$; $E^0 = 0{,}00$ V).

b) Les réactions indiquées sont observées sur les électrodes lorsque la tension U_{AK} devient supérieure à la différence $E^0(Br^-/Br_2) - E^0(Cu^{2+}/Cu)$, c'est-à-dire lorsque $\mathbf{U_{AK} > +0{,}74\ V}$.

c) On observe :

- autour de l'anode, une **teinte orangée** due au dibrome liquide qui se répand dans la solution (sa densité par rapport à l'eau étant supérieure à 1, la teinte descend par gravité) ;
- un **dépôt de cuivre** - métal rouge - sur la cathode.

3° Pendant une heure de fonctionnement, il a circulé la quantité d'électricité : $q = I\,.\,\Delta t$, d'où $q = 0{,}080 \times 3\,600 = 288$ C, soit environ $3\,.\,10^{-3}\,\mathcal{F}$.

Comme 1 mole de cuivre ou 63,5 g nécessitent $2\,\mathcal{F}$, la masse de cuivre déposé sur la cathode est :

$m = 63{,}5 \times \dfrac{3\,.\,10^{-3}}{2}$, soit 0,095 g, ou encore $\mathbf{m_{Cu} \approx 95\ mg}$.

20.7 1° ■ Sur l'anode, il y a oxydation d'un réducteur. Les ions nitrate NO_3^- qui se rapprochent de cette électrode ne peuvent être oxydés puisque NO_3^- est un oxydant.

Il ne peut y avoir qu'oxydation des molécules d'eau avec dégagement de dioxygène $[E^0(O_2/H_2O) = +1{,}23\ V]$ selon la demi-équation :

$$H_2O \rightarrow O_2 + 2\,H^+ + 2\,e^- .$$

■ Sur la cathode, il y a réduction d'un oxydant. Celui-ci peut être :

- soit Cu^{2+} $[E^0(Cu^{2+}/Cu) = +0{,}34\ V]$,
- soit Ag^+ $[E^0(Ag^+/Ag) = +0{,}80\ V]$.

Sans tenir compte du phénomène de surtension, la f.e.m. de l'électrolyseur serait :

- dans un cas $E_1 = 1{,}23 - 0{,}34 = 0{,}89\ V$,
- dans l'autre cas $E_2 = 1{,}23 - 0{,}80 = 0{,}43\ V$.

Si on tient compte du phénomène de surtension dû à la lenteur de la formation de O_2 sur l'anode, il faut ajouter environ 0,5 V à chacune des valeurs précédentes, soit : $E'_1 = 1{,}39\ V$ et $E'_2 = 0{,}93\ V$.

En maintenant la tension U_{AK} entre anode et cathode à une valeur comprise **entre 0,93 V et 1,39 V**, on ne recueillera que de l'**argent** sur la cathode de l'électrolyseur, selon la demi-équation :

$$Ag^+ + e^- \rightarrow Ag .$$

Au-delà, on recueillerait également du cuivre.

2° *a*) Pour $U_{AK} = 1{,}1\ V$, le métal qui se dépose est bien l'**argent**.

b) La réaction sur la cathode est :

$$\mathbf{Ag^+ + e^- \rightarrow Ag} .$$

20.8 1° *a*) Le gaz, soluble dans l'eau, décolorant l'indigo en solution, est le **dichlore Cl_2**.

b) Sur l'anode se produit une oxydation.

Les réducteurs présents, les ions chlorure Cl^- et les molécules d'eau H_2O, peuvent être oxydés.

Les potentiels d'oxydoréduction montrent que l'oxydation la plus facile est celle de H_2O, car :

$$E(O_2/H_2O) < E(Cl_2/Cl^-) .$$

La réaction observée ne confirme pas cette prévision.

c) Le phénomène à prendre en compte est l'**existence d'une surtension** due à la lenteur de la formation du dioxygène par oxydation forcée des molécules d'eau.

2° *a*) Sur la cathode, il y a un dégagement de dihydrogène dû à la réduction des ions H^+ fournis par dissociation ionique de l'eau suivant :

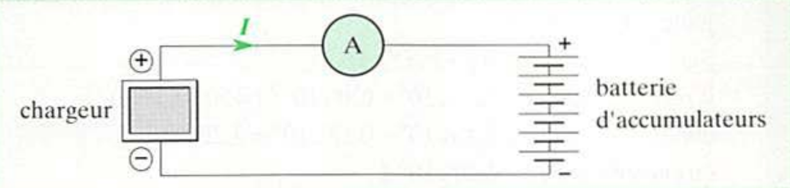
$$2\,H_2O \rightarrow 2\,H^+ + 2\,OH^-$$

puis : $$2\,H^+ + 2\,e^- \rightarrow H_2\nearrow$$

soit : $$\mathbf{2\,H_2O + 2\,e^- \rightarrow H_2\nearrow + 2\,OH^-}.$$

b) Le bilan précédent montre qu'il y a enrichissement de la solution en ions hydroxyde OH^- dans le compartiment cathodique : **la phénolphtaléine a alors une teinte rose violacé en présence de ces ions OH^-.**

20.9 **1°** La batterie d'accumulateurs est montée en opposition : sa borne + est connectée à la borne ⊕ du générateur. Elle se comporte alors en récepteur.



2° Les réactions ayant lieu pendant la charge sont :

a) **Sur l'anode** :

$$\mathbf{Pb^{2+} + 2\,H_2O \xrightarrow{\text{oxydation}} PbO_2 + 4\,H^+ + 2\,e^-},$$

soit une régénération de l'oxyde de plomb PbO_2.

b) **Sur la cathode** :

$$\mathbf{Pb^{2+} + 2\,e^- \xrightarrow{\text{réduction}} Pb},$$

soit une régénération du plomb sur la cathode.

3° La quantité d'électricité ayant circulé est :

$q = I\,.\,\Delta t$, d'où $\boldsymbol{q = 50\ A\,.\,h}$, ou encore $\boldsymbol{q = 1{,}8\,.\,10^5\ C}$.

4° *a*) La masse de plomb déposé est $m_{Pb} = M_{Pb}\,.\,n_{Pb}$.

Or $n_{Pb} = \dfrac{1}{2}\,n_{e^-} = \dfrac{1}{2} \times \dfrac{q}{96\,500} = 0{,}933$,

d'où $m_{Pb} = 207{,}2 \times \dfrac{1}{2} \times \dfrac{1{,}8\,.\,10^5}{96\,500} = 193{,}2$, soit $\boldsymbol{m_{Pb} \approx 193\ g}$.

b) La masse de dioxyde de plomb formé est :

$$m_{PbO_2} = M_{PbO_2}\,.\,n_{PbO_2}.$$

Or $n_{PbO_2} = n_{Pb} \approx 0{,}933$ mol et $M_{PbO_2} = 239{,}2\ g\,.\,mol^{-1}$,

d'où $m_{PbO_2} = 239{,}2 \times 0{,}933 \approx 223{,}1$, soit $\boldsymbol{m_{PbO_2} \approx 223\ g}$.

c) L'équation-bilan lors de la charge s'écrit :

$$2\,PbSO_4 + 2\,H_2O \rightarrow PbO_2 + Pb + 4\,H^+ + 2\,SO_4^{2-}.$$

La quantité d'acide sulfurique remise en solution est :

$$n_{H_2SO_4} = 2n_{Pb^{2+}} = 2n_{PbO_2} = 2n_{Pb}\,,$$

puisque les ions Pb^{2+} étaient combinés avec les ions sulfate SO_4^{2-}.

Donc $\mathbf{n_{H_2SO_4} = 1{,}865\ mol}$.

5° *a*) L'énergie fournie à la batterie est :

$W_E = U\,.\,I\,.\,\Delta t$, d'où $W_E = 13{,}2 \times 50 \times 3\,600 = 2\,376\,.\,10^3$,

soit $\mathbf{W_E \approx 2{,}38\,.\,10^6\ J}$.

b) L'énergie chimique $\Delta\mathscr{E}_{Ch}$ emmagasinée est égale à la différence entre l'énergie reçue W_E et l'énergie transférée sous forme de chaleur par effet joule : $Q = r\,.\,I^2\,.\,\Delta t$.

Soit : $\Delta\mathscr{E}_{Ch} = W_E - r\,.\,I^2\,.\,\Delta t$,

d'où : $\Delta\mathscr{E}_{Ch} = 2{,}38\,.\,10^6 - (20\,.\,10^{-3}) \times 50^2 \times 3\,600$,

donc : $\Delta\mathscr{E}_{Ch} = 2{,}38\,.\,10^6 - 0{,}18\,.\,10^6 = 2{,}20\,.\,10^6$,

ou encore : $\mathbf{\Delta\mathscr{E}_{Ch} = 2{,}20\,.\,10^6\ J}$.

c) Le rendement de la conversion est :

$\eta = \dfrac{\Delta\mathscr{E}_{Ch}}{W_E}$, d'où $\eta = \dfrac{2{,}20\,.\,10^6}{2{,}38\,.\,10^6}$,

soit $\eta \approx 0{,}924$, ou encore $\boldsymbol{\eta \approx 92{,}4\ \%}$.

21

CHALEUR DE RÉACTION

RÉSUMÉ DU COURS

■ On appelle **chaleur de réaction** d'une réaction chimique, la quantité de chaleur échangée entre le système réactionnel et le milieu extérieur, les produits de la réaction ayant été ramenés à la même température que les réactifs.

Dans la plupart des cas, les réactions chimiques ont lieu sous la pression atmosphérique : il s'agit alors de réactions s'effectuant sous pression constante.

La chaleur de réaction à pression constante est la quantité de chaleur mise en jeu par la réaction chimique au cours de laquelle le système réactionnel évolue sous pression constante.

La chaleur de réaction à pression constante est notée $Q_{r,\,P}$, ou plus simplement Q_r. Elle est mesurée, le plus souvent, en kilojoule (kJ) et correspond à la quantité de matière mise en jeu par l'équation-bilan donnée. La température et l'état physique des réactifs et des produits doivent être précisés.

■ Une réaction chimique est dite **exothermique** lorsque le système réactionnel **cède** de la chaleur au milieu extérieur.
La chaleur de réaction Q_r est alors négative.

■ Une réaction chimique est dite **endothermique** lorsque le système réactionnel **reçoit** de la chaleur du milieu extérieur.
La chaleur de réaction Q_r est alors positive.

■ Une réaction chimique est dite **athermique** lorsque le système réactionnel n'échange aucune chaleur avec l'extérieur : $Q_r = 0$.

La quantité de chaleur échangée entre le système réactionnel et le milieu extérieur est proportionnelle à la quantité de matière ayant réagi.

■ Principe de l'état initial et de l'état final :

La chaleur de réaction à pression constante ne dépend que de l'état initial et de l'état final du système réactionnel.

La chaleur de réaction d'une réaction donnée est l'opposé de la chaleur de réaction de la réaction inverse s'effectuant à la même pression et à la même température.

■ Définition :

Pour un corps diatomique AB, l'**énergie molaire de la liaison $A-B$** est l'énergie qu'il faut fournir à une mole d'entités AB prises à l'état gazeux pour les dissocier en leurs atomes constitutifs A et B à l'état gazeux et à une température donnée.

L'énergie molaire de la liaison est notée D_{A-B} ; elle est mesurée en $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ et elle est **positive**.

■ La chaleur de réaction correspond à la variation de l'énergie potentielle microscopique d'interaction entre les atomes du système réactionnel. Elle est déterminée par la variation de l'énergie chimique stockée dans les liaisons chimiques.

Le principe de l'état initial et de l'état final appliqué à un système réactionnel à l'état gazeux permet d'écrire :

$$\text{chaleur de réaction} = \begin{array}{c}\text{somme des énergies}\\ \text{de liaison}\\ \text{des liaisons rompues}\end{array} - \begin{array}{c}\text{somme des énergies}\\ \text{de liaison}\\ \text{des liaisons formées}\end{array}$$

■ Le calcul d'une chaleur de réaction peut nécessiter la connaissance de la chaleur molaire, ou capacité thermique molaire d'un corps, et (ou) de la chaleur latente molaire de changement d'état d'un corps pur.

La **chaleur molaire d'un corps pur** est la quantité de chaleur qu'il faut fournir sous une pression donnée à une mole de ce corps pur pour élever sa température de un kelvin ou de un degré Celsius. Elle est notée C_p.

La **chaleur latente molaire de changement d'état d'un corps pur** est la quantité de chaleur échangée entre une mole de ce corps et le milieu extérieur au cours d'un changement d'état donné, sous une pression et une température fixées. Elle est notée $\mathscr{L}$.

Les chaleurs molaires sont mesurées en joule par mole ou kilojoule par mole.

Le principe de l'état initial et de l'état final appliqué aux changements d'état d'un corps pur permet d'écrire :

$\mathscr{L}_{\text{solidification}} = -\mathscr{L}_{\text{fusion}}$ à la même température, avec $\mathscr{L}_{\text{fusion}} > 0$;
$\mathscr{L}_{\text{vaporisation}} = -\mathscr{L}_{\text{condensation}}$ à la même température, avec $\mathscr{L}_{\text{vaporisation}} > 0$

Remarque : dans le chapitre « Conservation de l'énergie », on a défini une chaleur latente massique L et une capacité thermique massique c.

Pour une substance de masse molaire M : $\mathscr{L} = M \cdot L$; $C_p = M \cdot c$.

Détermination de chaleurs de réaction

21.1 Synthèse de l'eau

On considère la réaction chimique suivante :

$$H_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(g)}.$$

La chaleur de réaction est :

$$Q_r = -243\ \text{kJ}, \text{ à } 100\ °\text{C sous la pression de } 1\ \text{bar}.$$

1° Cette réaction est-elle endothermique ? exothermique ?

2° Que signifie l'indice (g) porté en indice du symbole de chaque espèce chimique ?

3° La condensation d'une mole de vapeur d'eau cède 41 kJ au milieu extérieur dans les conditions ci-dessus.

Déterminer la chaleur de réaction correspondant à :

$$H_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(liq)}, \text{ à } 100\ °\text{C sous } P = 1\ \text{bar}.$$

21.2 Chaleur de formation du monoxyde de carbone

On donne les réactions chimiques et leurs chaleurs de réactions suivantes à 25 °C :

$$C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)};\ Q_{r_1} = -393\ \text{kJ}.$$

$$CO_{(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)};\ Q_{r_2} = -283\ \text{kJ}.$$

1° Montrer, à l'aide d'un schéma, qu'il est possible de passer de l'état initial $C_{(s)} + O_{2(g)}$ à l'état final $CO_{2(g)}$, soit directement, soit en passant par l'état intermédiaire $CO_{(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)}$.

2° Déterminer la chaleur de la réaction de formation de $CO_{(g)}$ à partir de $C_{(s)}$ et $O_{2(g)}$.

3° La réaction de formation de $CO_{(g)}$ est-elle exothermique ? endothermique ?

♦ 21.3 Aluminothermie

• La chaleur de réaction Q_{r_1} correspondant à la réaction :

$$2\,\mathrm{Fe}_{(s)} + \frac{3}{2}\mathrm{O}_{2(g)} \rightarrow \mathrm{Fe_2O}_{3(s)}$$

est appelée chaleur de formation de l'oxyde de fer III (Fe_2O_3) ;
$Q_{r_1} = -829{,}7$ kJ.

• La chaleur de réaction correspondant à la réaction :

$$\mathrm{Fe_2O}_{3(s)} + 2\,\mathrm{Al}_{(s)} \rightarrow \mathrm{Al_2O}_{3(s)} + 2\,\mathrm{Fe}_{(s)}$$

est $Q_{r_2} = -838{,}1$ kJ.

1° Montrer, à l'aide d'un schéma, que ces données permettent de déterminer la chaleur de formation Q_{r_3} d'une mole d'oxyde d'aluminium III, $Al_2O_{3(s)}$.

2° Calculer cette quantité de chaleur Q_{r_3}.

3° La réaction de formation de l'oxyde d'aluminium III est-elle exothermique ? endothermique ?

Variation de la chaleur de réaction avec la température

♦♦ 21.4 Oxydation du monoxyde de soufre

La chaleur de réaction correspondant à la réaction chimique :

$$\mathrm{SO}_{2(g)} + \frac{1}{2}\mathrm{O}_{2(g)} \rightarrow \mathrm{SO}_{3(g)}$$

est $Q_r = -94{,}9$ kJ à 100 °C sous pression constante égale à 1 bar.

1° Que signifie la donnée 100 °C ?

2° Les chaleurs (ou capacités thermiques) molaires à pression constante, entre 100 °C et 500 °C, sont :

- $C_p(O_2) = 29{,}4\ \mathrm{J\,.\,mol^{-1}}$;
- $C_p(SO_2) = 39{,}9\ \mathrm{J\,.\,mol^{-1}}$;
- $C_p(SO_3) = 50{,}7\ \mathrm{J\,.\,mol^{-1}}$.

a) Montrer, à l'aide d'un schéma des transformations et du principe de l'état initial et de l'état final, qu'on peut déterminer la chaleur de réaction Q'_r sous 1 bar, correspondant à l'équation donnée à 300 °C.

b) Calculer Q'_r.

c) Exprimer, par un pourcentage, la variation de la chaleur de réaction par rapport à la valeur à 100 °C.

♦♦ 21.5 Synthèse de l'eau

La chaleur de réaction correspondant à la réaction :

$$H_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(liq)}$$

est $Q_r = -284$ kJ à 25 °C sous 1 bar.

1° Les chaleurs molaires des corps purs entre 25 °C et 100 °C sous pression constante sont, pour :

$H_{2(g)}$: 28,8 J . mol^{-1}; $O_{2(g)}$: 29,4 J . mol^{-1}; $H_2O_{(liq)}$: 75,3 J . mol^{-1}.

Déterminer la chaleur de réaction sous 1 bar, Q'_r, correspondant à l'équation-bilan donnée à 100 °C.

2° La chaleur latente molaire de vaporisation de l'eau à 100 °C sous 1 bar est $\mathcal{L}_v = 41{,}0$ kJ . mol^{-1}.

Calculer la chaleur de réaction Q''_r correspondant à :

$$H_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(v)} \text{ à } 100\text{ °C sous 1 bar.}$$

Énergie de liaison et chaleur de réaction

♦ 21.6 Chaleur de formation de l'eau

1° Rappeler :

a) la définition de l'énergie molaire de liaison ;

b) la propriété des chaleurs de réaction de deux réactions chimiques inverses l'une de l'autre se déroulant dans les mêmes conditions de température et de pression.

2° On donne les énergies molaires de liaison suivantes :

$D_{H-H} = 432$ kJ . mol^{-1}; $D_{O=O} = 494$ kJ . mol^{-1}; $D_{O-H} = 460$ kJ . mol^{-1}.

Déterminer la chaleur de formation de l'eau correspondant à la réaction :

$$H_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(g)} \text{ à } 100\text{ °C et sous 1 bar.}$$

♦ 21.7 Synthèse de l'ammoniac

1° Écrire l'équation-bilan de la réaction chimique conduisant à deux moles d'ammoniac à partir des corps purs simples utilisés pour cette synthèse.

2° On donne les énergies molaires de liaison suivantes à 25 °C sous 1 bar :

$D_{H-H} = 432$ kJ . mol^{-1}; $D_{N\equiv N} = 940$ kJ . mol^{-1}; $D_{N-H} = 388$ kJ . mol^{-1}.

a) Écrire la relation permettant de déterminer la chaleur de réaction Q_r correspondant à l'équation-bilan.

b) Calculer cette chaleur de réaction.

3° La chaleur de réaction obtenue correspond à l'ammoniac à l'état gazeux sous la pression de un bar. La chaleur molaire latente de vaporisation de l'ammoniac est $\mathcal{L}_v = 23{,}2 \text{ kJ} . \text{mol}^{-1}$ à 25 °C sous 1 bar.
Déterminer la chaleur de réaction Q'_r correspondant à la même équation-bilan, l'ammoniac étant dans l'état liquide.

♦ 21.8 Pouvoir calorifique du méthane

1° Écrire l'équation-bilan de la réaction de combustion complète d'une mole de méthane (CH_4).

2° On donne les énergies molaires de liaison suivantes :

- $D_{O=O} = 494$ en $\text{kJ} . \text{mol}^{-1}$;
- $D_{C-H} = 410$ en $\text{kJ} . \text{mol}^{-1}$;
- $D_{C=O} = 795$ en $\text{kJ} . \text{mol}^{-1}$;
- $D_{O-H} = 460$ en $\text{kJ} . \text{mol}^{-1}$.

Déterminer la chaleur de réaction Q_r correspondant à l'équation-bilan précédente.

3° *a*) Calculer le pouvoir calorifique massique du méthane mesuré en $\text{kJ} . \text{g}^{-1}$ (ou $\text{MJ} . \text{kg}^{-1}$).

b) La masse volumique du méthane dans les conditions de référence (25 °C ; 1 bar) est $\rho = 0{,}66 \text{ g} . \text{dm}^{-3}$.
Exprimer le pouvoir calorifique en $\text{kJ} . \text{dm}^{-3}$.

c) Déterminer le pouvoir calorifique, en $\text{kJ} . \text{dm}^{-3}$, du mélange stœchiométrique méthane-air, sachant que l'air contient environ $\frac{1}{5}$ de son volume en dioxygène.

♦♦ 21.9 Chaleur de formation du graphite

On donne :

$C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)}$; $Q_r = -393 \text{ kJ}$;

$D_{C=O} = 795 \text{ kJ} . \text{mol}^{-1}$; $D_{O=O} = 494 \text{ kJ} . \text{mol}^{-1}$.

On considère que $C_{(s)}$ représente le carbone à l'état solide sous la forme graphite.

Déterminer la chaleur de réaction Q_f correspondant à la formation du graphite $C_{(s)}$ à partir de $C_{(g)}$.

CORRIGÉS DES EXERCICES

21.1 1° La réaction donnée est **exothermique** car la chaleur de réaction Q_r est négative : le système réactionnel cède de la chaleur au milieu extérieur.

2° L'indice (g) indique que **les réactifs et le produit de la réaction sont, dans ces conditions, à l'état gazeux.**

3° On peut schématiser les transformations conduisant au même état final :

$$\begin{tikzcd}
\boxed{H_{2(g)} + \frac{1}{2} O_{2(g)}} \arrow[rr, "Q'_r"] \arrow[dr, "Q_r"'] & & \boxed{H_2O_{(liq)}} \\
& H_2O_{(g)} \arrow[ur, "\text{condensation}", "\mathcal{L}_c"'] &
\end{tikzcd}$$

Le principe de l'état initial et de l'état final appliqué au système réactionnel permet d'écrire :

$Q'_r = Q_r + \mathcal{L}_c$, avec $\mathcal{L}_c = -41$ kJ,

car la condensation de la vapeur est exothermique,

d'où $Q'_r = -243 + (-41) = -284$, soit $\mathbf{Q'_r = -284}$ **kJ**.

21.2 1° Le **schéma ci-dessous** montre qu'à partir du même état initial, il est possible d'atteindre le même état final, soit directement, soit par passage par un état intermédiaire :

$$\begin{tikzcd}
\boxed{C_{(s)} + \frac{1}{2} O_{2(g)} + \frac{1}{2} O_{2(g)}} \arrow[rr, "Q_{r_1}"] \arrow[dr, "Q_f"'] & & \boxed{CO_{2(g)}} \\
& CO_{(g)} + \frac{1}{2} O_{2(g)} \arrow[ur, "Q_{r_2}"'] &
\end{tikzcd}$$

2° Le principe de l'état initial et de l'état final appliqué au système en réaction permet d'écrire :

$Q_{r_1} = Q_f + Q_{r_2}$, donc $Q_f = Q_{r_1} - Q_{r_2}$,

d'où $Q_f = -393 - (-283) = -110$,

soit $\mathbf{Q_f = -110}$ **kJ**.

3° La réaction de formation de CO à partir de $C_{(s)}$ et $O_{2(g)}$ est **exothermique**.

21.3 1° On peut **schématiser** l'ensemble des réactions données de la manière suivante :

$$\begin{tikzcd}
2\,Fe_{(s)} + \frac{3}{2}O_{2(g)} + 2\,Al_{(s)} \arrow[rr, "Q_{r_1}"] \arrow[dr, "Q_{r_3}"'] & & Fe_2O_{3(s)} + 2\,Al_{(s)} \arrow[dl, "Q_{r_2}"] \\
& Al_2O_{3(s)} + 2\,Fe_{(s)} &
\end{tikzcd}$$

Le principe de l'état initial et de l'état final permet d'écrire :

$$Q_{r_3} = Q_{r_1} + Q_{r_2}\,.$$

2° La chaleur molaire de formation de $Al_2O_{3(s)}$ est donc :

$Q_{r_3} = -829{,}7 + (-838{,}1) = -1\,667{,}8$, soit $\boldsymbol{Q_{r_3} = -1\,667{,}8\ \mathrm{kJ}}$.

3° La réaction de formation de l'oxyde d'aluminium est **exothermique**, car Q_{r_3} est négative.

21.4 1° La donnée 100 °C signifie que **la chaleur de réaction Q_r vaut − 94,9 kJ** lorsque les réactifs $SO_{2(g)}$ et $O_{2(g)}$ sont à la température initiale $\theta_1 = 100\ °C$, et que le produit de la réaction $SO_{3(g)}$ est revenu à la température finale $\theta_2 = \theta_1 = 100\ °C$.

2° *a*) **Schéma des transformations** possibles conduisant du même état initial au même état final :

$$\begin{tikzcd}
\begin{array}{c} SO_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \\ 100\ °C\ ;\ 1\ bar \end{array} \arrow[r, "Q_r"] \arrow[d, "Q_1"'] & \begin{array}{c} SO_{3(g)} \\ 100\ °C\ ;\ 1\ bar \end{array} \arrow[d, "Q_2"] \\
\begin{array}{c} SO_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \\ 300\ °C\ ;\ 1\ bar \end{array} \arrow[r, "Q'_r"] & \begin{array}{c} SO_{3(g)} \\ 300\ °C\ ;\ 1\ bar \end{array}
\end{tikzcd}$$

Le principe de l'état initial et de l'état final donne :

$Q_r + Q_2 = Q_1 + Q'_r$, d'où $\boldsymbol{Q'_r = Q_r + Q_2 - Q_1}$.

b) Les quantités de chaleur Q_1 et Q_2 correspondent respectivement à la chaleur nécessaire :

- pour amener les réactifs de la température $\theta_1 = 100\ °C$ à la température $\theta_2 = 300\ °C$;
- pour amener le produit de $\theta_1 = 100\ °C$ à $\theta_2 = 300\ °C$.

Alors $Q_1 = \left(C_p(SO_2) + \frac{1}{2} C_p(O_2)\right).(\theta_2 - \theta_1)$,

et $Q_2 = C_p(SO_3).(\theta_2 - \theta_1)$,

donc $Q'_r = Q_r + \left(C_p(SO_3) - C_p(SO_2) - \frac{1}{2} C_p(O_2)\right).\Delta\theta$,

d'où, en exprimant toutes les quantités de chaleur en kJ :

$Q'_r = -94{,}9 + \left(50{,}7 - 39{,}9 - \frac{29{,}4}{2}\right).10^{-3} \times 200 = -95{,}7$,

soit $\mathbf{Q'_r \approx -95{,}7}$ **kJ**.

c) $\Delta Q_r = Q'_r - Q_r = -0{,}8$ kJ, d'où $\frac{\Delta Q_r}{Q_r} \times 100 = \frac{-0{,}8}{-94{,}9} \times 100$,

soit $\frac{\Delta Q_r}{Q_r} \approx \mathbf{0{,}8}$ **%**.

21.5 1° Schématisons les différentes transformations conduisant du même état initial au même état final :

$$\begin{tikzcd}
\boxed{\begin{array}{c} H_{2(g)} + \frac{1}{2} O_{2(g)} \\ 25\ °C\ ;\ 1\ bar \end{array}} \arrow[r, "Q_r"] \arrow[d, "Q_1"'] & \boxed{\begin{array}{c} H_2O_{(liq)} \\ 25\ °C\ ;\ 1\ bar \end{array}} \arrow[d, "Q_2"] \\
\boxed{\begin{array}{c} H_{2(g)} + \frac{1}{2} O_{2(g)} \\ 100\ °C\ ;\ 1\ bar \end{array}} \arrow[r, "Q'_r"] & \boxed{\begin{array}{c} H_2O_{(liq)} \\ 100\ °C\ ;\ 1\ bar \end{array}}
\end{tikzcd}$$

Le principe de l'état initial et de l'état final permet d'écrire :

$Q_1 + Q'_r = Q_r + Q_2$, soit $Q'_r = Q_r + Q_2 - Q_1$.

Or $Q_1 = \left(C_p(H_2) + \frac{1}{2} C_p(O_2)\right).\Delta\theta$,

$Q_2 = C_p(H_2O)_{(liq)}.\Delta\theta$ et $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$,

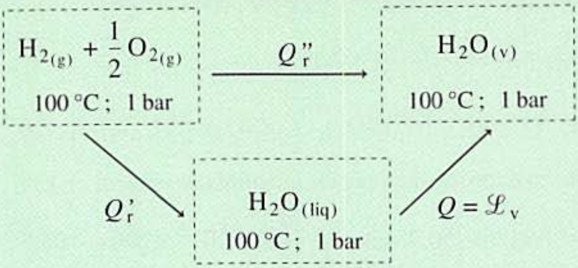
d'où $Q'_r = Q_r + \left(C_p(H_2O)_{(liq)} - C_p(H_2) - \frac{1}{2} C_p(O_2)\right).\Delta\theta$.

Application numérique : toutes les quantités de chaleur étant exprimées en kJ :

$Q'_r = -284 + \left(75{,}3 - 28{,}8 - \frac{29{,}4}{2}\right).10^{-3} \times 75$, d'où $Q'_r \approx -284 + 2{,}4$,

soit $\mathbf{Q'_r = -281{,}6}$ **kJ**.

2° Schématisons les transformations possibles du système réactionnel :



Le principe de l'état initial et de l'état final conduit à :

$Q''_r = Q'_r + \mathcal{L}_v$, d'où $Q''_r = -281{,}6 + (+41{,}0) = -240{,}6$,

soit $\mathbf{Q''_r = -240{,}6\ kJ}$.

21.6 1° *a*) L'énergie molaire de liaison D_{A-B} est **la quantité de chaleur qu'il faut fournir à une mole d'entités AB, à l'état gazeux et à une température donnée, pour les dissocier en une mole d'atomes A et une mole d'atomes B à l'état gazeux à la même température**.

b) Dans les mêmes conditions de température et de pression, **la chaleur de réaction d'une réaction chimique est l'opposé de celle de la réaction inverse se déroulant dans les mêmes conditions**. (Cette propriété découle du principe de l'état initial et de l'état final.)

2° ▪ *Première méthode :*

Écrivons la réaction de formation de l'eau :

$$H_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(g)} \quad Q_r.$$

D'après le principe de l'état initial et de l'état final :

$$Q_r = \begin{matrix}\text{somme des énergies de liaison}\\ \text{des liaisons rompues}\end{matrix} - \begin{matrix}\text{somme des énergies de liaison}\\ \text{des liaisons formées.}\end{matrix}$$

- **Liaisons rompues** :

dans une molécule de dihydrogène : 1 liaison H – H ;
dans une mole de dihydrogène : 1 mole de liaison ;
dans une molécule de dioxygène : 1 liaison O = O ;
donc pour une demi-mole de dioxygène : $\frac{1}{2}$ mole de liaison O = O.

- **Liaisons formées** :

dans une molécule d'eau, il y a deux liaisons O – H ; donc pour une mole d'eau, il y a eu formation de deux moles de liaison O – H.

Donc $Q_r = D_{H-H} + \frac{1}{2} D_{O=O} - 2\,D_{O-H}$,

d'où $Q_r = 432 + 247 - 920 = -241$, soit $\boldsymbol{Q_r = -241\ \text{kJ}}$.

■ *Deuxième méthode :*

Schématisons les transformations possibles permettant d'atteindre le même état final $H_2O_{(g)}$ à partir du même état initial $H_{2(g)} + \frac{1}{2} O_{2(g)}$:

$$\begin{tikzcd}
\boxed{\begin{array}{c} H_{2(g)} + \frac{1}{2} O_{2(g)} \\ 100\,°C\,;\ 1\ \text{bar} \end{array}} \arrow[rr, "Q_r"] \arrow[dr, "Q_1"'] & & \boxed{\begin{array}{c} H_2O_{(g)} \\ 100\,°C\,;\ 1\ \text{bar} \end{array}} \arrow[dl, "Q_2"] \\
& \begin{array}{c} H_{(g)} + H_{(g)} + \frac{1}{2}(O_{(g)} + O_{(g)}) \\ 100\,°C\,;\ 1\ \text{bar} \end{array} &
\end{tikzcd}$$

Le principe de l'état initial et de l'état final permet d'écrire :

$Q_r + Q_2 = Q_1$, soit $Q_r = Q_1 - Q_2$.

Or $Q_1 = D_{H-H} + \frac{1}{2} D_{O=O}$ et $Q_2 = -2\,D_{O-H}$.

Donc $Q_r = D_{H-H} + \frac{1}{2} D_{O=O} - 2\,D_{O-H}$.

On retrouve la même expression.

21.7 1° L'équation-bilan est :

$$\mathbf{3\,H_2 + N_2 \rightarrow 2\,NH_3}.$$

2° *a*) **Schéma** des transformations envisageables :

$$\begin{tikzcd}
\boxed{3\,H_{2(g)} + N_{2(g)}} \arrow[rr, "Q_r"] \arrow[dr, "Q_1"'] & & \boxed{2\,NH_{3(g)}} \arrow[dl, "Q_2"] \\
& 3\,(H_{(g)} + H_{(g)}) + (N_{(g)} + N_{(g)}) &
\end{tikzcd}$$

b) L'application du principe de l'état initial et de l'état final donne :

$Q_1 = Q_r + Q_2$, soit $Q_r = Q_1 - Q_2$.

Or $Q_1 = 3D_{H-H} + D_{N\equiv N}$ et $Q_2 = 2 \times 3\,.\,D_{N-H}$,

d'où $\boldsymbol{Q_r = 3D_{H-H} + D_{N\equiv N} - 6\,.\,D_{N-H}}$.

Cette relation peut être directement écrite en utilisant la première méthode du corrigé de l'exercice **21.6**.

c) $Q_r = 3 \times 432 + 940 - 6 \times 388 = -92$, soit $\boldsymbol{Q_r = -92\ \mathrm{kJ}}$.

3° Schématisons les transformations conduisant de l'état initial, corps simples à l'état gazeux sous 1 bar, à l'état final ammoniac liquide sous 1 bar :

$$\begin{tikzcd}
3\,H_{2(g)} + N_{2(g)} \arrow[rr, "Q'_r"] \arrow[dr, "Q_r"'] & & 2\,NH_{3(liq)} \arrow[dl, "Q = \mathcal{L}_v"] \\
& 2\,NH_{3(g)} &
\end{tikzcd}$$

$Q_r = Q'_r + Q$, donc $Q'_r = Q_r - Q = Q_r - \mathcal{L}_v$,
d'où $Q'_r = -92{,}0 - 23{,}2 = -115{,}2$, soit $\boldsymbol{Q'_r = -115{,}2\ \mathrm{kJ}}$.

21.8 1° $\mathbf{CH_{4(g)} + 2\,O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)} + 2\,H_2O_{(g)}}$.

2°

$$\begin{tikzcd}
\boxed{CH_{4(g)} + 2\,O_{2(g)}} \arrow[rr, "Q_r"] \arrow[dr, "Q_1"'] & & \boxed{CO_{2(g)} + 2\,H_2O_{(g)}} \\
& C_{(s)} + 4\,H_{(g)} + 2\,(O_{(g)} + O_{(g)}) \arrow[ur, "Q_2"'] &
\end{tikzcd}$$

$Q_r = Q_1 + Q_2$,
avec $Q_1 = 4D_{C-H} + 2D_{O=O}$ et $Q_2 = -2D_{C=O} + (-4D_{O-H})$;
donc $Q_r = 4D_{C-H} + 2D_{O=O} - (2D_{C=O} + 4D_{O-H})$,
d'où $Q_r = 4 \times 410 + 2 \times 494 - (2 \times 795 + 4 \times 460) = -802$,
soit $\boldsymbol{Q_r = -802\ \mathrm{kJ}}$.

3° *a*) Le pouvoir calorifique d'une mole de méthane est $|Q_r| = 802\ \mathrm{kJ}$.
La masse molaire du méthane est $M_{CH_4} = 12 + 4 \times 1 = 16\ \mathrm{g \cdot mol^{-1}}$.
Le pouvoir calorifique massique du méthane est donc :

$$\mathcal{P}_{cal} = \frac{|Q_r|}{M}, \text{ soit } \mathcal{P}_{cal} = \frac{802}{16} \approx 50{,}1\ \mathrm{kJ \cdot g^{-1}}, \text{ ou } \boldsymbol{\mathcal{P}_{cal} = 50{,}1\ \mathrm{MJ \cdot kg^{-1}}}.$$

b) Le pouvoir calorifique volumique, à 25 °C, est donc :

$\mathcal{P}'_{cal} = 50{,}1 \times 0{,}66$, soit $\boldsymbol{\mathcal{P}'_{cal} = 33{,}1\ \mathrm{kJ \cdot dm^{-3}}}$, ou $\boldsymbol{\mathcal{P}'_{cal} = 33{,}1\ \mathrm{MJ \cdot m^{-3}}}$.

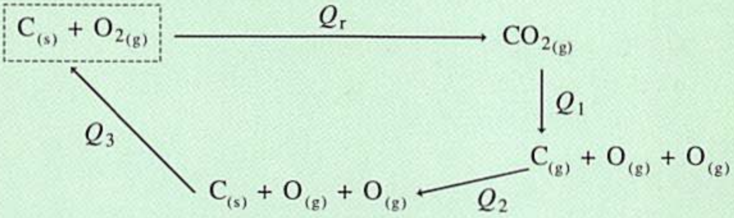
c) L'équation-bilan de la réaction montre que le volume de dioxygène nécessaire à la combustion complète du méthane est le double du volume de méthane. Comme le volume d'air nécessaire est cinq fois le volume de dioxygène, le volume d'air est donc dix fois celui du méthane.

La composition du mélange stœchiométrique est de 10 dm^3 d'air pour 1 dm^3 de méthane, soit 11 dm^3 de mélange (méthane - air) dont 1 dm^3 de méthane.

Le pouvoir calorifique du mélange est donc :

$\mathcal{P}_{\text{cal}} = \frac{33{,}1}{11} = \mathbf{3{,}00\ kJ\,.\,dm^{-3}}$, ou $\mathcal{P}_{\text{cal}} = \mathbf{3{,}00\ MJ\,.\,m^{-3}}$.

21.9 À partir de l'équation-bilan donnée, envisager une suite de transformations schématisée de la manière suivante :



Le principe de l'état initial et de l'état final permet d'écrire :

$Q_r + Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0$,

avec $Q_1 = 2D_{C=O}$, $Q_2 = Q_f$ et $Q_3 = -D_{O=O}$;

donc $Q_r + 2D_{C=O} + Q_f - D_{O=O} = 0$,

d'où $Q_f = -Q_r - 2D_{C=O} + D_{O=O}$,

puis $Q_f = +393 - 2 \times 795 + 494$, soit $\mathbf{Q_f = -703\ kJ}$.

22

POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE PAR LES OXYDES D'AZOTE ET DE SOUFRE

RÉSUMÉ DU COURS

Pollution atmosphérique

■ Les constituants de l'air sont :

• principalement (pour 99,97 % du volume d'air sec) le diazote, le dioxygène et l'argon ;

• les **constituants mineurs** ou secondaires, dioxyde de carbone (naturellement présent mais en augmentation), dioxyde de soufre, oxydes d'azote, chlorofluorocarbures d'apparition récente ;

• les **aérosols** (microgouttelettes) et poussières solides contenant des goudrons ou des métaux lourds et constituant, avec les précédents, l'essentiel de la pollution.

■ Depuis la formation de la Terre, la composition de l'atmosphère terrestre n'a cessé d'évoluer. Cette évolution s'est nettement accélérée au cours des deux derniers siècles, surtout en ce qui concerne les constituants mineurs. On attribue ces modifications de l'atmosphère à la pollution due à la civilisation industrielle.

■ Les sources identifiées de pollution atmosphérique sont de plusieurs sortes :

• la combustion des combustibles fossiles dans les moteurs à explosion, les centrales thermiques classiques et les installations de chauffage (formation d'oxydes de carbone CO_2 et CO, d'oxydes d'azote NO_x, de dioxyde de soufre SO_2 et libération d'hydrocarbures imbrûlés) ;

- les activités industrielles libérant des solvants organiques, des chlorofluorocarbures (CFC) ou des composés de métaux lourds ;
- la déforestation à grande échelle produisant des oxydes de carbone, d'azote et des poussières ;
- l'agriculture, principalement par utilisation excessive d'engrais azotés.

Les pluies acides

Les pluies acides sont une des conséquences directes de la pollution atmosphérique ; elles résultent de plusieurs réactions chimiques :

■ L'acidification due au dioxyde de carbone, CO_2 :

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H^+ + HCO_3^-, \text{ acide carbonique.}$$

■ L'acidification due au dioxyde de soufre, SO_2 :

$$SO_2 + H_2O \rightarrow H^+ + HSO_3^-, \text{ acide sulfureux.}$$

Avec l'eau oxygénée, H_2O_2, présente dans l'atmosphère (elle provient d'une oxydation de l'eau par l'ozone), on obtient :

$$SO_2 + H_2O_2 \rightarrow 2\,H^+ + SO_4^{2-}, \text{ acide sulfurique.}$$

■ L'acidification due au dioxyde d'azote, NO_2 :

$$3\,NO_2 + H_2O \rightarrow 2\,H^+ + 2\,NO_3^- + NO.$$

Avec l'eau oxygénée présente dans l'atmosphère, on obtient :

$$2\,NO_2 + H_2O_2 \rightarrow 2\,H^+ + 2\,NO_3^-, \text{ acide nitrique.}$$

Le pH moyen des pluies acides vaut environ 4. Leurs effets, surtout sensibles sur les végétaux, entraînent des conséquences sur la flore et la faune des régions touchées.

Un exemple de dosage : le dosage du dioxyde de soufre

■ Le dosage d'une espèce chimique dans un mélange est la détermination de la concentration de cette espèce chimique dans le mélange.

■ La réaction chimique choisie pour effectuer un dosage doit être totale et suffisamment rapide.

On mélange le réactif titrant et le réactif titré en proportion stœchiométrique. Lorsque la réaction est terminée, on atteint **l'équivalence**.

Le bilan molaire effectué à l'équivalence permet, connaissant la concentration du réactif titrant, d'en déduire la concentration du réactif à doser.

■ **Dosage du dioxyde de soufre en solution :** on utilise une réaction d'oxydoréduction avec le couple rédox du permanganate MnO_4^-/Mn^{2+}.

Les demi-équations électroniques en présence sont :

- le dioxyde de soufre **réducteur** :

$$SO_2 + 2H_2O \rightarrow SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e^-;$$

- l'ion permanganate **oxydant** :

$$MnO_4^- + 8H^+ + 5e^- \rightarrow Mn^{2+} + 4H_2O.$$

On obtient l'équation-bilan :

$$\boxed{2MnO_4^- + 5SO_2 + 2H_2O \rightarrow 2Mn^{2+} + 5SO_4^{2-} + 4H^+}$$

À l'équivalence, les proportions stœchiométriques étant respectées, le bilan en quantité de matière permet d'écrire :

$$\frac{n(MnO_4^-)}{2} = \frac{n(SO_2)}{5}, \text{ soit } 2n(SO_2) = 5n(MnO_4^-),$$

ou encore $2 \,.\, C(SO_2) \,.\, V = 5 \,.\, C(MnO_4^-) \,.\, V_{éq}$.

$V_{éq}$ représente le volume de solution titrante de concentration $C(MnO_4^-)$ versé à l'équivalence dans le volume V de solution à titrer de concentration inconnue $C(SO_2)$.

■ **Dosage colorimétrique des ions nitrate en solution :** on trempe dans la solution des bandelettes-tests contenant un mélange de réactifs permettant :

- de réduire les ions nitrate en ions nitrite :

$$NO_3^- + Zn + 2H^+ \rightarrow NO_2^- + Zn^{2+} + H_2O;$$

- de provoquer la coloration du réactif de Griess.

La coloration plus ou moins orangée permet, par comparaison avec une échelle de teintes, de déterminer la concentration en ions nitrate.

Intérêt industriel des oxydes d'azote et de soufre

■ L'acide nitrique est un composé indispensable dans la fabrication des engrais azotés, dans la fabrication d'explosifs et de certains réactifs utilisés en photographie. On obtient la succession de composés suivants :

$$NH_3 \rightarrow NO \rightarrow NO_2 \rightarrow HNO_3.$$

■ L'acide sulfurique, utilisé dans la fabrication des engrais phosphatés, des pigments minéraux et des détergents, est obtenu à partir du dioxyde de soufre. On obtient la succession de composés suivants :

$$SO_2 \rightarrow SO_3 \rightarrow H_2SO_4.$$

Les principales causes de pollution atmosphérique

22.1 Composition de l'atmosphère

1° *a*) Quels sont les deux constituants principaux de l'atmosphère terrestre ?

b) Donner l'ordre de grandeur de leurs proportions respectives.

2° *a*) Quel est le troisième constituant dans l'ordre d'importance ?

b) Citer, en la justifiant, au moins une utilisation pratique de ce constituant.

3° *a*) Quels sont les constituants mineurs de l'atmosphère ?

b) Indiquer pour chacun d'entre eux une origine possible.

22.2 Origines des pluies acides

1°*a*) Quel est l'ordre de grandeur du pH de l'eau de pluie naturelle ?

b) Comment peut-on expliquer la valeur de ce pH ?

c) Proposer une expérience afin de justifier l'explication précédente.

2° *a*) Qu'appelle-t-on « pluies acides » ?

b) Quels sont les polluants atmosphériques qui en sont responsables ?

c) Écrire à chaque fois les équations des réactions chimiques justifiant les réponses précédentes.

♦ 22.3 Émissions polluantes par secteur d'activité

Une étude sur la région Aquitaine a permis de dresser le tableau ci-dessous, faisant apparaître les diverses émissions polluantes, ainsi que l'énergie consommée en 1991 pour divers secteurs d'activités.

Émissions par secteur d'activité

Secteurs d'activité	Consommation Éner.(ktep **)	Émission CO (tonne)	Émission CO_2 (tonne)	Émission NO_x (tonne)	Émission SO_2 (tonne)
Agriculture	219	6 118	717 572	1 538	1 810
BGC *	62	52	194 210	149	854
Énergie	309	...	1 180 625	117 713	8 795
Industrie	1 354	2 229	4 022 567	11 563	21 728
Résidentiel	1 256	823	4 417 899	3 404	3 709
Tertiaire	393	289	1 098 535	1 100	2 094
Transports	2 080	402 191	6 066 510	72 169	6 409
Total	5 675	411 705	17 697 919	91 639	45 403

* Bâtiment ** kilotonne-équivalent-pétrole

1° Quels sont les secteurs d'activités les plus polluants :

a) en dioxyde de carbone ?

b) en oxydes d'azote ?

c) en dioxyde de soufre ?

2° *a*) Calculer, pour les divers secteurs d'activité, l'émission de dioxyde de carbone en tonne par ktep consommée.

b) Quel est le secteur le plus polluant ?

3° Mêmes questions pour le dioxyde de soufre.

4° *a*) Compte tenu des réponses précédentes, en quel milieu (urbain ou rural) la pollution est-elle la plus importante ?

b) Citer un exemple bien connu.

♦ 22.4 Émissions polluantes par type d'énergie

Une étude concernant la région Aquitaine a permis de dresser le tableau suivant, faisant apparaître les émissions polluantes en fonction des diverses sources d'énergie.

Émissions par type d'énergie

Sources d'énergie	Consommation Éner.(ktep)	Émission CO (tonne)	Émission CO_2 (tonne)	Émission NO_x (tonne)	Émission SO_2 (tonne)
C.M.S. *	269	267	1 215 902	1 995	9 482
Carburéacteur	103	8	32 413	30	30
Divers	593	1 342	3 308 543	3 838	11 851
Essence	1 187	309 865	3 721 980	47 488	1 899
Fuel domestique	885	793	2 780 906	2 244	5 310
Fuel lourd	240	303	660 209	1 498	12 291
G.P.L.	185	190	583 032	493	138
Gasoil	761	98 222	2 308 226	25 655	4 398
Gaz	1 450	712	3 086 705	8 394	…
Total	5 675	411 705	17 697 919	91 639	45 403

* C.M.S. : Combustibles Minéraux Solides (charbon, lignite …)

1° *a*) Quelle est la source d'énergie la plus polluante en CO_2 par ktep consommée?

b) Le G.P.L., gaz de pétrole liquéfié, est un mélange qui contient en masse 54 % de propane et 46 % de butane. Écrire les équations chimiques des réactions de combustion du G.P.L.

c) En déduire la masse de CO_2 émis par kilotonne de combustible.

2° *a*) Quelle est la source d'énergie la plus polluante en SO_2 par ktep consommée ?

b) Expliquer.

c) Pourquoi l'émission de SO_2 est-elle inexistante avec le gaz ?

Réactions de dosage

♦ 22.5 Dosage du dioxyde de soufre en solution

Pour doser le dioxyde de soufre contenu dans un certain volume connu d'air, on fait barboter ce volume d'air dans un volume $V_e = 1$ L d'eau ; on obtient ainsi une solution de dioxyde de soufre de concentration inconnue C_{SO_2} dont on prélève un volume V_{SO_2}.

1° *a*) Écrire la demi-équation électronique du couple rédox SO_4^{2-}/SO_2 relatif au dioxyde de soufre.

b) Quels sont les nombres d'oxydation de l'élément S dans le 1^er^ membre et dans le 2^e^ membre de la demi-équation ?

c) Le dioxyde de soufre est-il oxydant ou réducteur dans ce couple rédox ?

2° *a*) On utilise comme réactif titrant du permanganate de potassium. Écrire la demi-équation du couple MnO_4^-/Mn^{2+}.

b) Quelle est, dans ce couple, l'espèce oxydante ?

3° *a*) Écrire l'équation-bilan de la réaction entre les deux solutions utilisées.

b) Écrire la relation qui existe à l'équivalence entre les volumes et les concentrations respectives des deux solutions ayant réagi.

c) Quelle était la masse de dioxyde de soufre SO_2 présente dans le volume d'air ?

Données : $V_{MnO_4^-} = 15$ mL ; $C_{MnO_4^-} = 0{,}02$ mol . L^{-1} ; $V_{SO_2} = 10$ mL ; $S = 32$ g ; $O = 16$ g.

♦♦ 22.6 Dosage du dioxyde de soufre par le couple I_2/I^-

Pour doser le dioxyde de soufre SO_2 contenu dans une solution, on peut utiliser le couple rédox I_2/I^- contenu dans une solution titrée.

1° *a*) Écrire la demi-équation électronique correspondant à ce couple rédox.

b) Quelle est l'espèce oxydante dans ce couple ?

2° Lorsqu'on met en présence la solution précédente et une solution de dioxyde de soufre SO_2, il se produit une réaction chimique.

a) Le dioxyde de soufre est-il oxydant ou réducteur dans cette réaction ?

b) Écrire alors la demi-équation électronique correspondant au couple rédox de SO_2.

3° Le diiode I_2 en solution donne une coloration brune alors que l'ion iodure I^- est incolore. Un peu d'empois d'amidon renforce la teinte brune.

a) Écrire l'équation-bilan de la réaction entre les deux solutions.

b) Indiquer comment on pourra reconnaître l'équivalence.

c) On dose un volume $V_{SO_2} = 20$ mL de solution de dioxyde de soufre par une solution titrée de diiode de concentration molaire $C_{I_2} = 0{,}088 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. On atteint l'équivalence après avoir ajouté un volume $V_{I_2} = 12$ mL de solution de diiode.
Calculer la concentration molaire de la solution de dioxyde de soufre.

d) Quel volume de dioxyde de soufre a-t-on dissous dans 0,5 L d'eau pour obtenir la solution précédente ?

Donnée : $V_{mol} = 24$ L dans ces conditions.

Fabrication de deux constituants principaux des engrais

♦ 22.7 Fabrication de l'acide sulfurique

Le dioxyde de soufre SO_2, polluant responsable des pluies acides, est un composé utile par ailleurs pour fabriquer l'acide sulfurique.
On utilise industriellement un procédé catalytique qui peut être décrit en deux étapes : oxydation du dioxyde de soufre en trioxyde de soufre et hydratation du trioxyde de soufre.

1° *a*) Écrire l'équation-bilan de l'oxydation du dioxyde de soufre.

b) Quels sont les nombres d'oxydation du soufre, avant et après cette oxydation ?

2° *a*) Écrire l'équation-bilan de l'hydratation du trioxyde de soufre.

b) Quels sont les nombres d'oxydation du soufre avant et après cette deuxième réaction ?

3° On souhaite fabriquer 1 tonne d'acide sulfurique par cette réaction et avec un rendement de 70 %. Quelle masse de dioxyde de soufre doit-on utiliser ?

Données : H = 1 g ; O = 16 g ; S = 32 g.

♦♦ 22.8 Fabrication de l'acide nitrique

L'acide nitrique est un composé indispensable dans la fabrication des engrais azotés.

Sa préparation se fait à partir d'oxydes d'azote. Ceux-ci sont des polluants de l'atmosphère, mais aussi des matières premières très utiles.

1° Dans un ancien procédé, on utilisait la réaction de l'acide sulfurique sur le nitrate de sodium suivant l'équation-bilan :

$$NaNO_3 + H_2SO_4 \rightarrow HNaSO_4 + HNO_3 .$$

a) Indiquer les nombres d'oxydation avant et après réaction, pour les éléments azote N et soufre S .

b) Conclure.

2° Le procédé synthétique s'appuie sur les quatre réactions suivantes dont voici les équations-bilan :

$$a\,NH_3 + b\,O_2 \xrightarrow[750\,^\circ C]{Pt} c\,NO + d\,H_2O . \quad (1)$$

$$a\,NO + b\,O_2 \longrightarrow c\,NO_2 . \quad (2)$$

$$a\,NO_2 + b\,H_2O \longrightarrow c\,HNO_2 + d\,HNO_3 . \quad (3)$$

$$a\,HNO_2 \longrightarrow b\,HNO_3 + c\,NO + d\,H_2O . \quad (4)$$

a) Équilibrer chacune des équations-bilan en trouvant la valeur des divers coefficients a , b , c ... (les a , b et c changent d'une équation à l'autre).

b) Donner un nom à chacune de ces quatre réactions chimiques, indiquant le type de transformation chimique subie par le composé azoté. Justifier, éventuellement, en utilisant les nombres d'oxydation.

3° Tout se passe globalement comme s'il s'agissait d'une seule réaction chimique ayant l'ammoniac NH_3 comme premier réactif et l'acide nitrique HNO_3 comme produit.

a) Écrire l'unique équation-bilan de cette réaction théorique.

b) On veut fabriquer 1 tonne d'acide nitrique par ce procédé dont le rendement est de 75 % ; quel est le volume nécessaire d'ammoniac à l'état gazeux ?

Données : $V_{mol} = 24$ L ; H = 1 g ; N = 14 g ; O = 16 g ; S = 32 g .

CORRIGÉS DES EXERCICES

22.1 1° *a*) Les deux constituants principaux de l'atmosphère terrestre sont le **diazote N_2** et le **dioxygène O_2**.

b) Proportions respectives : sensiblement **4/5 de diazote** et **1/5 de dioxygène**.

2° *a*) Le 3^e composé par ordre d'importance est l'**argon Ar**.

b) Il fait partie de la colonne *O* (colonne des gaz rares) ; il est donc inerte chimiquement et **on l'utilise pour éviter des oxydations** (gaz des lampes à incandescence, soudure de l'aluminium sous argon).

3° *a*) et *b*) • **dioxyde de carbone** CO_2 **provenant des combustions** ;

• **dioxyde de soufre** SO_2 **provenant des combustions d'hydrocarbures** contenant du soufre ;

• **oxydes d'azote** NO_x **résultant de combustions et de la décomposition d'engrais azotés** ;

• **chlorofluorocarbures** (C.F.C.) **provenant d'activités industrielles ou domestiques.**

22.2 1° *a*) Le pH de l'eau de pluie naturelle est très légèrement acide : **pH ≈ 5,6**.

b) C'est la **présence naturelle dans l'atmosphère de dioxyde de carbone** CO_2, très soluble dans l'eau, qui est responsable de cette acidité :

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H^+ + HCO_3^-, \text{ acide carbonique.}$$

c) En prenant dans un verre à pied de l'eau distillée en présence de B.B.T., on note une coloration verte (pH ≈ 7). En soufflant à l'aide d'une pipette dans l'eau, on constate que le B.B.T. vire au jaune ; cela prouve que la solution devient acide. **C'est le dioxyde de carbone expiré qui s'est dissous dans l'eau en lui donnant un caractère acide.**

2° *a*) On considère que les pluies sont des « pluies acides » **lorsque le pH devient inférieur ou égal à 4**.

b) Les polluants responsables sont les composés solubles dans l'eau et conduisant à la libération de protons H^+. Il s'agit, en plus du **dioxyde de carbone**, du **dioxyde de soufre** SO_2 et du **dioxyde d'azote** NO_2.

c) $$\mathbf{SO_2 + H_2O \rightarrow \underbrace{H^+ + HSO_3^-}_{\text{acide sulfureux}}} ;$$

$$\mathbf{3\,NO_2 + H_2O \rightarrow \underbrace{2\,H^+ + 2\,NO_3^- + NO}_{\text{acide nitrique}}}.$$

22.3 1° Les secteurs les plus polluants pour la région Aquitaine sont :

a) les « **transports** » pour le dioxyde de carbone CO_2 ;

b) les « **transports** » pour les oxydes d'azote NO_x ;

c) l'**industrie** pour le dioxyde de soufre SO_2.

2° *a*) et **3°** *a*)

Secteur d'activité	Consommation (ktep)	Émission CO_2 (t/ktep)	Émission SO_2 (t/ktep)
Agriculture	219	3 277	8,3
Bâtiment	62	3 137	13,8
Énergie	309	3 821	28,5
Industrie	1 354	2 971	16
Résidentiel	1 256	3 517	3
Tertiaire	393	2 795	5,3
Transports	2 080	2 917	3,1

b) C'est le **secteur producteur d'énergie** qui est le plus polluant en dioxyde de carbone, par ktep consommée, suivi par le secteur résidentiel. Dans les deux cas, cela provient de la combustion d'hydrocarbures.

3° *b*) Pour la même raison, c'est aussi le **secteur producteur d'énergie** (les hydrocarbures contenant du soufre en impureté).

4° *a*) La pollution la plus importante se trouve en **milieu urbain**.

b) La ville d'**Athènes**, très industrielle et très peuplée.

22.4 1° *a*) et **2°** *a*)
La source la plus polluante en CO_2 est notée « **divers** » ; elle contient le **bois** et ensuite les **combustibles minéraux solides** (C.M.S.) comportant le charbon et la lignite.

Sources d'énergie	Émission CO_2 (t/ktep)	Émission SO_2 (t/ktep)
C.M.S.	4 520	35,2
Carburéacteur	315	0,3
Divers	5 579	20
Essence	3 136	1,6
Fuel domestique	3 142	6
Fuel lourd	2 751	51,2
G.P.L.	3 151	0,7
Gasoil	3 033	5,8
Gaz	2 129	0

b) • La formule du propane est C_3H_8. La combustion complète du **propane** a pour équation-bilan :

$$C_3H_8 + 5\,O_2 \rightarrow 3\,CO_2 + 4\,H_2O\,.$$

• La combustion complète du **butane** a pour équation-bilan :

$$C_4H_{10} + \frac{13}{2}O_2 \rightarrow 4\,CO_2 + 5\,H_2O\,.$$

c) 1 mole de propane (soit $m_{\text{prop}} = 3 \times 12 + 8 = 44$ g) produit 3 moles de CO_2 (soit $m_{CO_2} = 3 \times 44 = 132$ g). 1 mole de butane produit 4 moles de CO_2. 1 kilotonne de G.P.L. contient 540 tonnes de propane et 460 tonnes de butane,

soit $\dfrac{540}{44} \times 10^6 = 12{,}3\,.\,10^6$ moles de propane

et $\dfrac{460}{58} \times 10^6 = 7{,}9\,.\,10^6$ moles de butane.

Quantité de CO_2 produit : $(12{,}3 \times 3 + 7{,}9 \times 4)\,10^6$ mol.

Masse de CO_2 produit : $(68{,}5) \times 10^6 \times 44\,.\,10^{-6} = 3\,014$ tonnes,

$= \mathbf{3{,}014}$ **kilotonnes**.

2° *a*) et *b*) C'est le **fuel lourd**, mélange d'hydrocarbures le moins raffiné et contenant des composés soufrés.

c) Le gaz naturel est traité après extraction ; en particulier, **il est purifié pour éliminer les composés soufrés** qui sont corrosifs pour les installations de distribution. Le soufre ainsi obtenu est commercialisé (usine de Lacq).

22.5 1° *a*) $SO_2 + 2\,H_2O \rightleftarrows SO_4^{2-} + 4\,H^+ + 2\,e^-$.

b) Les nombres d'oxydation du soufre sont **+ IV** dans SO_2 et **+ VI** dans SO_4^{2-}.

c) Le nombre d'oxydation du soufre ayant augmenté, le dioxyde de soufre a donc été oxydé, il est **réducteur**.

2° *a*) $MnO_4^- + 8\,H^+ + 5\,e^- \rightleftarrows Mn^{2+} + 4\,H_2O$.

b) L'espèce oxydante est celle qui capte les électrons ; ici, c'est l'**ion permanganate MnO_4^-**.

On pouvait aussi le prévoir puisque le permanganate a été choisi dans l'énoncé pour réagir avec SO_2 dont on a prouvé en **1°** *c*) qu'il était réducteur.

3° *a*) Combinons, par addition membre à membre, les demi-équations après les avoir multipliées respectivement par 5 et par 2 pour obtenir un même nombre d'électrons transférés :

$$2\,MnO_4^- + 5\,SO_2 + 2\,H_2O \rightarrow 2\,Mn^{2+} + 5\,SO_4^{2-} + 4\,H^+.$$

b) À l'équivalence, les réactifs ont réagi en proportions stœchiométriques, 2 moles d'ions MnO_4^- pour 5 moles de SO_2.

Soit, en quantité de matière :

$\frac{n_{MnO_4^-}}{n_{SO_2}} = \frac{2}{5}$, avec $n_{MnO_4^-} = C_{MnO_4^-} . V_{MnO_4^-}$ et $n_{SO_2} = C_{SO_2} . V_{SO_2}$.

D'où la relation $\boldsymbol{C_{SO_2} . V_{SO_2} = \frac{5}{2} C_{MnO_4^-} . V_{MnO_4^-}}$.

c) Calculons la concentration en SO_2 de la solution à doser :

$$C_{SO_2} = \frac{5 . C_{MnO_4^-} . V_{MnO_4^-}}{2 . V_{SO_2}} = \frac{5 \times 0{,}02 \times 15 . 10^{-3}}{2 \times 10 . 10^{-3}},$$

soit $\boldsymbol{C_{SO_2} = 0{,}075\ mol . L^{-1}}$.

Or, la masse molaire de SO_2 vaut $M_{SO_2} = 32 + 2 \times 16 = 64$ g.

La masse de SO_2 dans la solution à doser est donc :

$m_{SO_2} = C_{SO_2} . V_e . M_{SO_2}$, d'où $m_{SO_2} = 0{,}075 \times 1 \times 64 = 4{,}8$ g,

soit $\boldsymbol{m_{SO_2} = 4{,}8\ g}$.

22.6 1° *a*) $\mathbf{I_2 + 2\,e^- \rightleftarrows 2\,I^-}$.

b) Le **diiode** qui capte les électrons est l'espèce **oxydante**.

2° *a*) Puisque le dioxyde de soufre réagit avec une espèce oxydante (I_2), il est **réducteur**.

b) $\mathbf{SO_2 + 2\,H_2O \rightleftarrows SO_4^{2-} + 4\,H^+ + 2\,e^-}$.

3° *a*) $\mathbf{SO_2 + 2\,H_2O + I_2 \rightleftarrows SO_4^{2-} + 4\,H^+ + 2\,I^-}$.

b) À l'équivalence, **la coloration brune du diiode aura totalement disparu**, toutes les espèces produites étant alors incolores.

c) À l'équivalence, les réactifs ont réagi en proportions stœchiométriques, soit 1 mole de SO_2 avec 1 mole de I_2.

Donc $n_{SO_2} = n_{I_2}$, d'où $C_{SO_2} . V_{SO_2} = C_{I_2} . V_{I_2}$.

Il vient :

$$C_{SO_2} = C_{I_2} . \frac{V_{I_2}}{V_{SO_2}} = 0{,}088 \times \frac{12 . 10^{-3}}{20 . 10^{-3}} = 0{,}052\,8,$$

soit $\boldsymbol{C_{SO_2} \approx 0{,}053\ mol . L^{-1}}$.

d) Dans $V = 0{,}5$ L de solution, il y a la quantité de matière :

$$n = V . C_{SO_2} = 0{,}5 \times 0{,}053 = 0{,}026\,5.$$

Dans ces conditions, le volume correspondant de gaz dissous est :

$V = n . V_{mol} = 0{,}026\,5 \times 24 = 0{,}636$, soit $\boldsymbol{V = 0{,}636\ L}$.

22.7 1° *a*) $\mathbf{SO_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow SO_3}$.

b) n.o. = **+ IV** dans SO_2 et n.o. = **+ VI** dans SO_3.

2° *a*) $\mathbf{SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4}$.

b) n.o. = **+ VI** dans SO_3 et n.o. = **+ VI** dans H_2SO_4.
Il n'y a donc pas oxydation de l'élément soufre lors de l'hydratation.

3° Écrivons l'équation-bilan globale des deux réactions chimiques utilisées industriellement :

$$SO_2 + \frac{1}{2} O_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_4 .$$

Une mole de dioxyde SO_2 conduit à 1 mole d'acide sulfurique H_2SO_4.

- Les masses molaires respectives valent :

$$M_{SO_2} = 32 + 2 \times 16 = 64 \text{ g} \quad \text{et} \quad M_{H_2SO_4} = 2 + 32 + 4 \times 16 = 98 \text{ g} .$$

- Les masses de réactifs et les masses de produits étant proportionnelles :

$$\frac{m_{SO_2}}{m_{H_2SO_4}} = \frac{64}{98} = 0{,}653 .$$

Donc, pour 1 tonne = 10^3 kg d'acide sulfurique, il faudrait 0,653 t de SO_2 si le rendement était de 100 %.
Avec un rendement de 70 %, il faudra une masse m'_{SO_2} telle que :

$$m'_{SO_2} = \frac{m_{SO_2}}{0{,}7} = \frac{0{,}653}{0{,}7} = 0{,}932\,9 , \quad \text{soit} \quad \mathbf{m'_{SO_2} \approx 0{,}933 \text{ tonne}} .$$

22.8 1° *a*) ▪ Élément azote N :
- dans $NaNO_3$: n.o. = **+ V** ; • dans HNO_3 : n.o. = **+ V**.

▪ Élément soufre S :
- dans H_2SO_4 : n.o. = **+ VI** ; • dans $HNaSO_4$: n.o. = **+ VI**.

b) **Cette réaction n'est donc pas une oxydoréduction**, puisque les n.o. des éléments en présence n'ont pas varié.

2° *a*)

(1) : $\mathbf{2\,NH_3 + \frac{5}{2} O_2 \rightarrow 2\,NO + 3\,H_2O}$.
(2) : $\mathbf{2\,NO + O_2 \rightarrow 2\,NO_2}$.
(3) : $\mathbf{2\,NO_2 + H_2O \rightarrow HNO_2 + HNO_3}$.
(4) : $\mathbf{3\,HNO_2 \rightarrow HNO_3 + 2\,NO + H_2O}$.

b) (1) est une **oxydation** de l'ammoniac par le dioxygène. Le n.o. de l'azote passe de − III à + II.

(2) est une **oxydation** de monoxyde d'azote (polluant atmosphérique) par le dioxygène. Le n.o. de l'azote passe de + II à + IV .

(3) est une **hydratation** de dioxyde d'azote (polluant atmosphérique). C'est aussi une réaction de dismutation. Le nombre d'oxydation de l'azote passe de + IV à + III dans HNO_2 et à + V dans HNO_3 .
Le dioxyde d'azote subit à la fois une réduction et une oxydation.

(4) est une **décomposition** de l'acide nitreux. C'est aussi une dismutation. Le nombre d'oxydation de l'azote passe de + III à respectivement + V dans HNO_3 et + II dans NO .

3° *a*) Multiplions par trois les coefficients stœchiométriques des équations-bilan (1), (2) et (3), et additionnons avec l'équation (4) :

$$6\,NH_3 + \frac{15}{2}O_2 + 6\,NO + 3\,O_2 + 6\,NO_2 + 3\,H_2O + 3\,HNO_2 \rightarrow$$

$$6\,NO + 9\,H_2O + 6\,NO_2 + 3\,HNO_2 + HNO_3 + 3\,HNO_3 + 2\,NO + H_2O.$$

Regroupons les termes et éliminons ceux qui se retrouvent en quantité égale dans les deux membres ; il vient :

$$\mathbf{6\,NH_3 + \frac{21}{2}O_2 \rightarrow 4\,HNO_3 + 7\,H_2O + 2\,NO\,.}$$

b) La masse molaire de l'acide nitrique est $M_{HNO_3} = 1 + 14 + (16 \times 3) = 63$ g . On veut donc fabriquer une quantité de matière (acide nitrique) :

$$n_{HNO_3} = \frac{1\,000}{63\,.\,10^{-3}} = 15{,}87\,.\,10^3 \text{ moles}\,.$$

Les coefficients de l'équation-bilan montrent qu'il faut 6 moles d'ammoniac pour 4 moles d'acide nitrique, donc :

$$n_{NH_3} = \frac{6}{4}\,n_{HNO_3}, \text{ d'où } n_{NH_3} = 1{,}5\,n_{HNO_3} = 1{,}5 \times 15{,}87\,.\,10^3 = 23\,810 \text{ moles.}$$

Le rendement étant de 75 % , il faudra en réalité :

$$n'_{NH_3} = \frac{n_{NH_3}}{0{,}75} = \frac{23\,810}{0{,}75} = 31\,747 \text{ moles}\,.$$

Le volume d'ammoniac gazeux nécessaire dans ces conditions sera :

$V = n\,.\,V_{mol} = 31\,747 \times 24 = 761\,928$, d'où $V = 761\,928$ L ,

soit $V \approx \mathbf{762\ m^3}$.

23

DISSOLUTION DES COMPOSÉS IONIQUES ET MOLÉCULAIRES DANS L'EAU

RÉSUMÉ DU COURS

Dissolution des composés ioniques

Le cristal ionique

La cohésion d'un cristal ionique est caractérisée par son énergie réticulaire : c'est l'énergie qu'il faut fournir à une mole du cristal pour le dissocier en ses ions à l'état gazeux, à température et pression constantes.

Exemple :

$$\mathrm{NaCl}_{\text{(cristal)}} \rightarrow \mathrm{Na}^{+}_{(g)} + \mathrm{Cl}^{-}_{(g)}.$$

À 298 K, sous la pression $p = 1$ bar, $\mathscr{E}_{\text{rét}} = 794\ \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Dissolution d'un cristal ionique

La dissolution d'un cristal ionique dans l'eau fait intervenir trois phénomènes :

- la dissociation des ions qui conduit à la destruction du cristal ;
- l'hydratation des ions ;
- la dispersion des ions hydratés au sein de la solution.

La dissociation et la dispersion nécessitent un apport d'énergie : ce sont des phénomènes **endothermiques** $(Q > 0)$.
L'hydratation est **exothermique** $(Q < 0)$.

■ On appelle **chaleur molaire de dissolution** du cristal ionique, Q_{diss}, l'énergie libérée par la dissolution d'une mole de ce cristal dans l'eau à température et pression constantes.

Exemple :

$$NaCl_{(\text{cristal})} \rightarrow Na^+_{(\text{aq})} + Cl^-_{(\text{aq})} .$$

À 298 K, sous la pression $p = 1$ bar, $Q_{\text{diss}} = +4 \text{ kJ} . \text{mol}^{-1}$.

■ On appelle **chaleur molaire d'hydratation** d'un ion à température et pression constantes, l'énergie libérée lors de l'hydratation d'un ion.

Exemples :

$$Na^+_{(\text{g})} \rightarrow Na^+_{(\text{aq})} ;$$

à 298 K, $Q_{\text{hyd}}(Na^+) = -410 \text{ kJ} . \text{mol}^{-1}$.

$$Cl^-_{(\text{g})} \rightarrow Cl^-_{(\text{aq})} ;$$

à 298 K, $Q_{\text{hyd}}(Cl^-) = -380 \text{ kJ} . \text{mol}^{-1}$.

■ D'après le principe de conservation de l'énergie pour un composé ionique :

$$\boxed{Q_{\text{diss}} = Q_{\text{hyd}} \text{ (des ions)} + \mathscr{E}_{\text{rét}}}$$

Exemple :

pour NaCl, $Q_{\text{diss}} = Q_{\text{hyd}}(Na^+) + Q_{\text{hyd}}(Cl^-) + \mathscr{E}_{\text{rét}}$,

d'où $Q_{\text{diss}} = -410 - 380 + 794$,

soit $Q_{\text{diss}} = +4 \text{ kJ} . \text{mol}^{-1}$.

■ Solubilité d'un composé

La solubilité dans l'eau d'un composé ionique, à une température donnée, est la quantité de composé que l'on peut dissoudre pour obtenir 1 L de solution saturée à cette température.

Lorsque la température augmente, la solubilité :

- augmente si la dissolution est endothermique,
- diminue si la dissolution est exothermique.

Dissolution des composés moléculaires

■ Dissolution du chlorure d'hydrogène dans l'eau

Le chlorure d'hydrogène est un gaz très soluble dans l'eau ; sa dissolution est exothermique.

La solubilité du chlorure d'hydrogène dans l'eau diminue quand la température croît.

Les molécules HCl et H_2O sont polaires : les atomes de ces molécules ont des électronégativités différentes. Le barycentre des charges positives ne coïncide pas avec celui des charges négatives. La molécule possède alors un moment dipolaire.

Des molécules polaires pouvant interagir entre elles, le chlorure d'hydrogène est très soluble dans l'eau.

D'autre part, les ions obtenus sont hydratés :

$$HCl + H_2O \rightarrow H_3O^+_{(aq)} + Cl^-_{(aq)}.$$

La rupture des liaisons $H - Cl$ et la dispersion des ions sont endothermiques ; l'hydratation est fortement exothermique.
Le bilan global fait que la dissolution est exothermique.

■ Dissolution de l'ammoniac dans l'eau

La molécule NH_3 est polaire. L'ammoniac est très soluble dans l'eau ; la dissolution est exothermique car les molécules subissent une hydratation.

■ Dissolution des acides dans l'eau

Toutes les molécules d'acide sont polaires : les acides sont solubles dans l'eau, la dissolution étant exothermique.

■ Dissolution de CO_2, méthane

Ces composés ne sont pas polaires : ils sont donc très peu solubles dans l'eau. CO_2 est cependant plus soluble dans l'eau que le méthane CH_4.
La plupart des composés organiques ne sont pas polaires : ils sont insolubles dans l'eau.

Chaleur de dissolution

23.1 Chlorure d'ammonium

Calculer la chaleur de dissolution de 0,2 mole de chlorure d'ammonium dans l'eau, sachant que l'énergie réticulaire du cristal de chlorure d'ammonium est égale à $\mathscr{E}_{\text{rét}} = 705 \text{ kJ} . \text{mol}^{-1}$.

Données :

$NH^+_{4(g)} \xrightarrow{\text{eau}} NH^+_{4(aq)} \quad Q_{\text{hyd}} = -310 \text{ kJ} . \text{mol}^{-1}$;

$Cl^-_{(g)} \xrightarrow{\text{eau}} Cl^-_{(aq)} \quad Q_{\text{hyd}} = -380 \text{ kJ} . \text{mol}^{-1}$.

♦ 23.2 Sulfate de calcium

La chaleur de dissolution de 68,1 g de sulfate de calcium dans l'eau est égale à : $Q_1 = -9 \text{ kJ}$.
La chaleur molaire d'hydratation des ions Ca^{2+} vaut :
$Q_{\text{hyd}} = -1\,575 \text{ kJ} . \text{mol}^{-1}$;
et celle des ions sulfate SO_4^{2-} : $Q_{\text{hyd}} = -1\,060 \text{ kJ} . \text{mol}^{-1}$.

1° Calculer la chaleur molaire de dissolution du sulfate de calcium.

2° En déduire l'énergie réticulaire du sulfate de calcium.

♦ 23.3 Dissolution endothermique et exothermique

L'énergie réticulaire du cristal de fluorure de lithium (LiF) est égale à $1\,035 \text{ kJ} . \text{mol}^{-1}$; celle du cristal de fluorure de potassium est de $814 \text{ kJ} . \text{mol}^{-1}$.

1° Calculer les chaleurs molaires de dissolution de chaque cristal.

2° Quel est le composé ionique qui, lors de la dissolution dans l'eau, fait diminuer ou augmenter la température de la solution ?

Données : chaleurs d'hydratation des ions, en $\text{kJ} . \text{mol}^{-1}$:
$Li^+ (-520)$; $F^- (-515)$; $K^+ (-320)$.

23.4 Chlorure de calcium

La chaleur de dissolution de 20 g de chlorure de calcium dans l'eau est égale à : $Q_1 = -14{,}6 \text{ kJ}$.
La chaleur molaire d'hydratation des ions Ca^{2+} vaut :
$Q_2 = -1\,575 \text{ kJ} . \text{mol}^{-1}$;
et l'énergie réticulaire du chlorure de calcium $\mathscr{E}_{\text{rét}} = 2\,254 \text{ kJ} . \text{mol}^{-1}$.

1° Calculer la chaleur molaire de dissolution du chlorure de calcium.

2° En déduire la chaleur molaire d'hydratation des ions chlorure.

♦ 23.5 Bilan énergétique

Dans un calorimètre contenant de l'eau, on dissout $m = 5{,}6$ g de potasse KOH. Le système {solution - calorimètre} a une capacité thermique $\mu = 680\ \text{J}\,.\,°\text{C}^{-1}$. On observe une élévation de température $\Delta\theta = 8\ °\text{C}$.

1° Calculer la quantité de chaleur Q dégagée par la dissolution.

2° Quelle quantité de potasse a-t-on dissoute ?

3° Calculer la chaleur molaire de dissolution de la potasse.

4° Sachant que la chaleur molaire d'hydratation des ions potassium est égale à $-320\ \text{kJ}\,.\,\text{mol}^{-1}$ et celle des ions hydroxyde à $-460\ \text{kJ}\,.\,\text{mol}^{-1}$, calculer l'énergie réticulaire du cristal KOH.

Solubilité de composés ioniques

23.6 Iodure de plomb

1° À 25 °C, la solubilité de l'iodure de plomb PbI_2 est égale à $0{,}55\ \text{g}\,.\,\text{L}^{-1}$. Calculer cette solubilité en $\text{mol}\,.\,\text{L}^{-1}$.

2° Combien de moles d'ions Pb^{2+} et de moles d'ions I^- contient 0,2 L d'une solution saturée en iodure de plomb ?

23.7 Chlorure de sodium

La solubilité du chlorure de sodium est égale à $6\ \text{mol}\,.\,\text{L}^{-1}$ à 25 °C.

1° Quelle masse de sel peut dissoudre 1 L d'eau à 25 °C ?

2° La mer Méditerranée contient 33 g de sel par litre. Est-elle saturée en sel ?

3° La mer Morte (Palestine) contient 351 g de sel par litre. Est-elle saturée en sel ? Conclure.

23.8 Nitrate de baryum

La solubilité du nitrate de baryum est égale à $0{,}35\ \text{mol}\,.\,\text{L}^{-1}$, à la température de 25 °C.
Dans 0,5 L d'eau, on verse 100 g de nitrate de baryum.

1° La solution est-elle saturée ? Justifier.

2° Calculer la concentration de la solution, en ions baryum puis en ions nitrate.

♦ 23.9 Solubilité de différents sulfates

On donne, en mol . L^{-1}, la solubilité à la température de 25 °C des composés ioniques suivants :

- sulfate de sodium : 4,3 ;
- sulfate de magnésium : 3,0 ;
- sulfate de baryum : $9{,}5 \cdot 10^{-6}$.

1° *a*) Quel est le composé le plus soluble dans l'eau ?

b) Pourquoi l'ion Ba^{2+} est-il le réactif des ions SO_4^{2-} ?

2° *a*) Donner la formule des cristaux des composés ioniques étudiés.

b) Calculer, en mol . L^{-1}, les concentrations en ions Na^+, Mg^{2+} et Ba^{2+} des solutions précédentes saturées.

3° *a*) Quelle quantité d'ions sodium contiennent 20 cm^3 d'une solution saturée de sulfate de sodium ?

b) On ajoute une mole de sulfate de sodium. Quelle est la nouvelle quantité d'ions sodium que contient cette solution ?

Solubilité de composés moléculaires

♦ 23.10 Chlorure d'hydrogène

On dissout, à 25 °C, sous la pression de 1 bar, 1,5 L de chlorure d'hydrogène dans 40 cm^3 d'eau.

1° Cette dissolution est-elle endothermique ou exothermique ?

2° Quelle est l'influence de la température sur la solubilité de ce gaz ?

3° Calculer la concentration, en mol . L^{-1}, de la solution obtenue.

Donnée : $V_m = 25$ L.

♦♦ 23.11 Facteurs influençant la solubilité

1° Indiquer si les molécules des composés suivants sont linéaires ou non linéaires. Pourquoi ? SO_2 (polaire) ; CO_2 (non polaire) ; H_2O (polaire).

2° Quel est le composé très soluble dans l'eau ? Pourquoi ?

3° Lorsqu'on procède à la dissolution du composé précédent dans l'eau, on observe une élévation de température de la solution.
Cette dissolution est-elle :

a) endothermique ou exothermique ?

b) favorisée par une élévation de température ?

CORRIGÉS DES EXERCICES

23.1 $NH_4Cl_{\text{(cristal)}} \xrightarrow{\text{eau}} NH^+_{4\text{(aq)}} + Cl^-_{\text{(aq)}}$.

$Q_{\text{diss}}(NH_4Cl) = \mathscr{E}_{\text{rét}} + Q_{\text{hyd}}(NH_4^+) + Q_{\text{hyd}}(Cl^-)$,

d'où $Q_{\text{diss}}(NH_4Cl) = \mathscr{E}_{\text{rét}} + Q_1 + Q_2$,

soit $Q_{\text{diss}} = 705 - 310 - 380 = \mathbf{15\ kJ\,.\,mol^{-1}}$.

La chaleur de dissolution de 0,2 mole de chlorure d'ammonium est donc égale à $15 \times 0{,}2 = 3$ kJ. Cette dissolution est endothermique : elle nécessite un transfert d'énergie du solvant (l'eau) vers le soluté.

23.2 1° Calculons la masse molaire du sulfate de calcium :

$CaSO_4 = 40{,}1 + 32{,}1 + (4 \times 16{,}0) = 136{,}2\ \text{g}\,.\,\text{mol}^{-1}$;

68,1 g de $CaSO_4$ correspondent à $\dfrac{68{,}1}{136{,}2} = 0{,}5$ mol.

La chaleur molaire de dissolution du sulfate de calcium est donc égale à :

$-9 \times \dfrac{1}{0{,}5} = -18\ \text{kJ}\,.\,\text{mol}^{-1}$, soit $\mathbf{Q_{\text{diss}} = -18\ kJ\,.\,mol^{-1}}$.

2° $\mathscr{E}_{\text{rét}} = Q_{\text{diss}} - Q_{\text{hyd}}(Ca^{2+}) - Q_{\text{hyd}}(SO_4^{2-})$,

d'où $\mathscr{E}_{\text{rét}} = -18 + 1\,575 + 1\,060 = 2\,617$, soit $\mathbf{\mathscr{E}_{\text{rét}} = 2\,617\ kJ\,.\,mol^{-1}}$.

23.3 1° • Pour le cristal LiF : $LiF \rightarrow Li^+_{\text{(aq)}} + F^-_{\text{(aq)}}$,

donc $Q_{\text{diss}} = \mathscr{E}_R + Q_{\text{hyd}}(Li^+) + Q_{\text{hyd}}(F^-)$,

d'où $Q_{\text{diss}} = 1\,035 - 520 - 515 = 0\ \text{kJ}\,.\,\text{mol}^{-1}$.

• Pour le cristal KF : $KF \rightarrow K^+_{\text{(aq)}} + F^-_{\text{(aq)}}$,

donc $Q_{\text{diss}} = \mathscr{E}_R + Q_{\text{hyd}}(K^+) + Q_{\text{hyd}}(F^-)$,

d'où $Q_{\text{diss}} = 814 - 320 - 515 = -21\ \text{kJ}\,.\,\text{mol}^{-1}$.

Conclusion : $\mathbf{Q_{\text{diss}}(LiF) = 0\ kJ\,.\,mol^{-1}}$; $\mathbf{Q_{\text{diss}}(KF) = -21\ kJ\,.\,mol^{-1}}$.

2° La dissolution de LiF est pratiquement athermique alors que celle de KF est exothermique : c'est la dissolution de F qui fait augmenter la température de la solution.

23.4 1° Calculons la masse molaire du chlorure de calcium :

$M(CaCl_2) = 40{,}1 + (2 \times 35{,}5) = 111{,}1\ \text{g}\,.\,\text{mol}^{-1}$.

À 20 g de $CaCl_2$ correspond $\dfrac{20}{111{,}1} = 0{,}18$ mol.

La chaleur de dissolution de 0,18 mole de chlorure de calcium est de $-14{,}6\ \mathrm{kJ}$.

Donc $-14{,}6 = Q_{\text{diss}} \times 0{,}18$, d'où $Q_{\text{diss}} = -81$,

soit $\boldsymbol{Q_{\text{diss}} \approx -81\ \mathrm{kJ\,.\,mol^{-1}}}$.

2° Écrivons la réaction de dissolution :

$$\mathrm{CaCl_2 \rightarrow Ca^{2+}_{(aq)} + 2\,Cl^{-}_{(aq)}}.$$

Remarquons qu'il y a formation de 2 moles d'ions $\mathrm{Cl^{-}_{(aq)}}$ pour 1 mole d'ions $\mathrm{Ca^{2+}_{(aq)}}$.

$Q_{\text{diss}} = \mathscr{E}_{\text{rét}} + Q_{\text{hyd}}(\mathrm{Ca^{2+}}) + 2\,.\,Q_{\text{hyd}}(\mathrm{Cl^{-}})$,

donc $Q_{\text{hyd}}(\mathrm{Cl^{-}}) = \dfrac{Q_{\text{diss}} - \mathscr{E}_{\text{rét}} - Q_{\text{hyd}}(\mathrm{Ca^{2+}})}{2}$,

d'où $Q_{\text{hyd}}(\mathrm{Cl^{-}}) = \dfrac{-81 - 2\,254 + 1\,575}{2} = -380$,

soit $\boldsymbol{Q_{\text{hyd}}(\mathrm{Cl^{-}}) = -380\ \mathrm{kJ\,.\,mol^{-1}}}$.

23.5 **1°** Le vase calorimétrique et son contenu étant thermiquement isolés, on peut écrire : $\Delta\mathscr{E}_{\text{mic}} = \mu\,.\,\Delta\theta + Q = 0$,

d'où $Q = -\mu\,.\,\Delta\theta = -680 \times 8$, soit $\boldsymbol{Q = -5\,440\ \mathrm{J}}$.

2° Calculons la masse molaire de la potasse :

$$\mathrm{KOH} = 39{,}1 + 16 + 1 = 56{,}1\ \mathrm{g\,.\,mol^{-1}}.$$

On a dissous $\dfrac{5{,}6}{56{,}1} \approx$ **0,1 mole de potasse**.

3° $Q_{\text{diss}} = -5\,440 \times \dfrac{1}{0{,}1} = -54\,400\ \mathrm{J\,.\,mol^{-1}}$,

soit $\boldsymbol{Q_{\text{diss}} \approx -55\ \mathrm{kJ\,.\,mol^{-1}}}$.

4° $\mathscr{E}_{\text{rét}} = Q_{\text{diss}} - Q_{\text{hyd}}(\mathrm{K^{+}}) - Q_{\text{hyd}}(\mathrm{OH^{-}})$,

d'où $\mathscr{E}_{\text{rét}} = -55 + 320 + 460 = 725$, soit $\boldsymbol{\mathscr{E}_{\text{rét}} = 725\ \mathrm{kJ\,.\,mol^{-1}}}$.

23.6 **1°** Calculons la masse molaire de $\mathrm{PbI_2}$:

$$M(\mathrm{PbI_2}) = 207{,}2 + 2 \times 126{,}9 = 461\ \mathrm{g\,.\,mol^{-1}}.$$

0,55 g de $\mathrm{PbI_2}$ correspond à $\dfrac{0{,}55}{461} = 1{,}2\,.\,10^{-3}\ \mathrm{mol}$.

À 25 °C, la solubilité de l'iodure de plomb est égale à $\boldsymbol{1{,}2\,.\,10^{-3}\ \mathrm{mol\,.\,L^{-1}}}$.

2° • 1 L de solution saturée en $\mathrm{PbI_2}$ contient :

$1{,}2\,.\,10^{-3}$ mole d'ion $\mathrm{Pb^{2+}}$ et $2 \times 1{,}2\,.\,10^{-3} = 2{,}4\,.\,10^{-3}$ mole d'ions $\mathrm{I^{-}}$.

- 0,2 L de solution saturée contient donc :

$1,2 . 10^{-3} \times 0,2 = \mathbf{2,4 . 10^{-4}}$ **mole d'ions** $\mathbf{Pb^{2+}}$,
soit $2,4 . 10^{-3} \times 0,2 = \mathbf{4,8 . 10^{-4}}$ **mole d'ions** $\mathbf{I^-}$.

23.7 1° Calculons la masse molaire du chlorure de sodium :
$M(\mathrm{NaCl}) = 23 + 35,5 = 58,5\ \mathrm{g . mol^{-1}}$.
1 L d'eau peut dissoudre 351 g de sel à 25 °C.

2° $33 < 351$; **la mer Méditerranée n'est pas saturée en sel.**

3° **La mer Morte est saturée en sel** ; le fond est recouvert de plaques de sel solide.

23.8 1° Calculons la masse molaire du nitrate de baryum :

$$M(\mathrm{Ba(NO_3)_2}) = 137,3 + 2(14 + 3 \times 16) = 261,3\ \mathrm{g . mol^{-1}}.$$

La solubilité du nitrate de baryum est égale à :

$$261,3 \times 0,35 = 91,5\ \mathrm{g . L^{-1}}.$$

Ainsi, une solution saturée de 0,5 L de nitrate de baryum contiendra :

$$91,5 \times 0,5 = 45,75\ \mathrm{g} \text{ de nitrate de baryum.}$$

Si, dans 0,5 L d'eau, on verse 100 g de nitrate de baryum, **la solution sera saturée** (tout le composé ne sera pas dissous).

2° La solution étant saturée, elle contiendra **0,35 mol . L^{-1} d'ions baryum** et **0,70 mol . L^{-1} d'ions nitrate**.

23.9 1° *a*) Le composé le plus soluble est celui qui présente la plus grande solubilité en mol . L^{-1} ; c'est donc le **sulfate de sodium**.

b) **La solubilité du sulfate de baryum est très faible**. L'introduction d'ions sulfate dans une solution contenant des ions $\mathrm{Ba^{2+}}$ provoque la précipitation du sulfate de baryum très peu soluble.

2° *a*) $\mathbf{Na_2SO_4}$; $\mathbf{MgSO_4}$; $\mathbf{BaSO_4}$.

b) • Concentration en ions $\mathrm{Na^+}$: $2 \times 4,3 = \mathbf{8,6\ mol . L^{-1}}$.

- Concentration en ions $\mathrm{Mg^{2+}}$: $\mathbf{3\ mol . L^{-1}}$.
- Concentration en ions $\mathrm{Ba^{2+}}$: $\mathbf{9,5 . 10^{-6}\ mol . L^{-1}}$.

3° *a*) 20 cm^3 contiennent $8,6 \times 20 . 10^{-3} = \mathbf{0,172}$ **mole d'ions** $\mathbf{Na^+}$.

b) La solution est saturée ; **les quantités d'ions** $\mathbf{Na^+_{(aq)}}$ **et** $\mathbf{SO^{2-}_{4(aq)}}$ **ne varieront pas**. Le sulfate de sodium ajouté précipitera au fond du récipient.

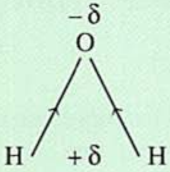
23.10 1° La dissolution du chlorure d'hydrogène est **exothermique**.

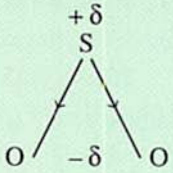
2° **La solubilité est favorisée par une diminution de température**.

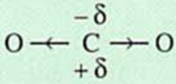
3° La quantité de chlorure d'hydrogène contenue dans 1,5 L à 25 °C sous 1 bar est : $n = \frac{1,5}{25} = 0,06$ mol .

0,06 mole a été dissoute dans 40 cm^3 d'eau (0,040 L) ; donc, la concentration de la solution obtenue est égale à : $\frac{0,06}{0,04} = \mathbf{1,5\ mol\ .\ L^{-1}}$.

23.11 1° Les molécules **SO_2 et H_2O** sont des **molécules polaires** : elles possèdent donc un moment dipolaire. Le barycentre des charges positives ne coïncide pas avec le barycentre des charges négatives. Elles ne peuvent donc pas être linéaires (absence de symétrie).
En revanche, **CO_2** est une **molécule linéaire**, car elle n'est pas polaire.







2° L'eau, moléculaire polaire, dissout préférentiellement les composés polaires. **SO_2 est donc plus soluble** dans l'eau que CO_2 .

3° *a*) Elle est **exothermique**.

b) La réaction étant exothermique, elle est favorisée, au contraire, **par une diminution de température**.

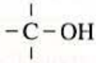
24

FONCTIONS ORGANIQUES OXYGÉNÉES

RÉSUMÉ DU COURS

Les alcools

Le groupement fonctionnel alcool est :



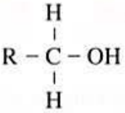
$$-\overset{|}{\underset{|}{\mathrm{C}}}-\mathrm{OH}$$

La formule d'un alcool dérive de celle d'un hydrocarbure par substitution du groupe **hydroxyle $-$ OH** à un atome d'hydrogène fixé sur un carbone tétragonal.

Il existe trois classes d'alcool.

Avec R , R' , R'' , groupes carbonés identiques ou différents :

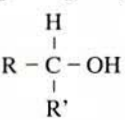
- **Alcool primaire** :



$$\mathrm{R}-\underset{\mathrm{H}}{\overset{\mathrm{H}}{\mathrm{C}}}-\mathrm{OH}$$

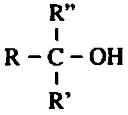
Exemple : $CH_3-CH_2-CH_2OH$ propan – 1 – ol .

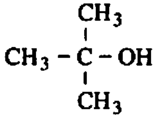
- **Alcool secondaire** :



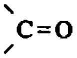
$$\mathrm{R}-\underset{\mathrm{R'}}{\overset{\mathrm{H}}{\mathrm{C}}}-\mathrm{OH}$$

Exemple : $CH_3-CH\,OH-CH_2-CH_3$ butan – 2 – ol .

- **Alcool tertiaire :** 
$R-C(R')(R'')-OH$

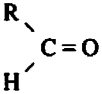
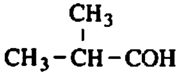
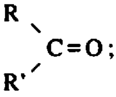
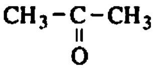
Exemple : 
$CH_3-C(CH_3)_2-OH$ 2-méthylpropan-2-ol.

Les aldéhydes et cétones

Le groupement **fonctionnel carbonyle** est : 

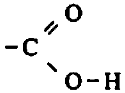
L'atome de carbone fonctionnel lié à l'atome d'oxygène par une double liaison est trigonal.

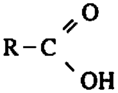
Les fonctions aldéhyde et cétone ont le même groupement fonctionnel **carbonyle** mais diffèrent par l'environnement de ce groupement.

- **Aldéhyde :**  ; *exemple :* 
$CH_3-CH(CH_3)-COH$ 2-méthylpropanal.
- **Cétone :**  ; *exemple :* 
$CH_3-CO-CH_3$ propanone ou acétone (nom usuel).

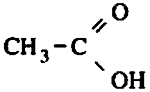
Les acides carboxyliques

Les acides carboxyliques ont pour groupement fonctionnel le groupe **carbonyle** :



La formule générale des acides carboxyliques s'écrit : 

Le nom de l'acide carboxylique dérive de celui de l'alcane de même chaîne carbonée en remplaçant le « e » final par la terminaison « oïque ».

Exemple :  acide éthanoïque ou acide acétique (nom usuel).

Les groupements fonctionnels

24.1 Reconnaître les groupements fonctionnels

Le glucose, le fructose et le ribose sont des sucres naturels.

Le glucose, connu sous le nom de dextrose, se trouve à l'état naturel dans nombre de fruits (raisin) et de plantes.

Le fructose est l'édulcorant naturel le plus puissant rencontré dans le miel et certains fruits.

Le ribose est un élément de construction des molécules d'acides ribonucléiques.

- Glucose : $CHO-CHOH-CHOH-CHOH-CHOH-CH_2OH$.
- Fructose : $CH_2OH-CO-CHOH-CHOH-CHOH-CH_2OH$.
- Ribose : $CHO-CHOH-CHOH-CHOH-CH_2OH$.

1° Réécrire les formules en faisant apparaître et en les nommant les divers groupements fonctionnels (formules développées).

2° Quels sont les sucres isomères de fonction ?

24.2 Classe des alcools et nomenclature

Écrire la formule développée de chacun des alcools suivants en précisant leur classe.

a) méthanol ;

b) propan – 2 – ol ;

c) pentan – 2 – ol ;

d) butan – 1 – ol ;

e) 3 – méthylbutan – 2 – ol ;

f) 3 – méthylpentan – 3 – ol .

♦ 24.3 Groupe carbonyle

Soient les formules développées de plusieurs corps présentant le groupe carbonyle :
$HCHO$; CH_3-CHO ; $CH_3-CO-CH_3$; $CH_3-CH_2-CO-CH_3$.

1° Réécrire les formules développées faisant apparaître le groupement fonctionnel. Donner le nom systématique de ces composés.

2° Certains présentent des isomères de position. Donner leur formule semi-développée et leur nom.

♦ 24.4 Acides carboxyliques usuels

Le tableau suivant donne le nom usuel et le nom systématique de plusieurs acides carboxyliques.

Nom usuel	formique	acétique	propionique	butyrique
Nom systématique	méthanoïque	éthanoïque	propanoïque	butanoïque

1° Donner leur formule semi-développée.

2° Les acides carboxyliques ont des températures de fusion et d'ébullition plus élevées que les alcanes de même chaîne carbonée. Ils sont miscibles à l'eau en toutes proportions. Justifier ces propriétés.

♦♦ 24.5 Préparation des alcools

Dans l'industrie, certains alcools simples sont préparés à partir de l'hydratation des alcènes en présence d'acide sulfurique (*cf.* cours de Seconde).

On additionne de l'eau sur les alcènes suivants :

a) but – 1 – ène ;

b) 2 – méthylpropène ;

c) 3 – méthylbut – 2 – ène ;

d) 2,3 – diméthylbut – 1 – ène.

1° Donner la formule semi-développée de chaque alcène.

2° Montrer que l'on peut prévoir dans chacun des cas la formation de deux alcools par fixation de H et OH provenant de l'eau.

3° Donner le nom des alcools préférentiellement formés et leur classe, l'alcool de la classe la plus élevée se formant en priorité.

♦ 24.6 Composés carbonyles à chaîne non saturée

Une salade fraîche contient les composés suivants :

- hex – 2 – énal (arôme de tomate),
- oct – 3 – ène – 2 – one (arôme de champignon),
- non – 2 – énal (parfum de concombre).

1° Donner la formule développée de ces composés.

2° Pour chacun de ces composés, donner un isomère de position pour la fonction carbonyle sans changer la position de la double liaison $C = C$. Écrire leur nom.

♦♦ 24.7 Formule d'un énal

On veut déterminer la structure d'une molécule organique oxygénée (la molécule ne comporte qu'un seul atome d'oxygène) qui donne l'arôme de la tomate.

1° La combustion complète d'un échantillon de $m = 9{,}8$ g donne 9,0 g d'eau et 14,4 L de dioxyde de carbone dans des conditions telles que le volume molaire gazeux est de $24{,}0\ \text{L}\,.\,\text{mol}^{-1}$.

a) Quelle est la composition centésimale massique en carbone, hydrogène et oxygène, sachant que la molécule contient un atome d'oxygène ?

b) Quelle est sa composition molaire ?

c) Donner la formule brute de ce composé.

2° Cette molécule est un alcène non ramifié avec un groupement fonctionnel aldéhyde. La double liaison est le plus proche possible de la fonction carbonyle. Donner la formule semi-développée de cette molécule.

Données :
$M(\text{H}) = 1\ \text{g}\,.\,\text{mol}^{-1}$; $M(\text{C}) = 12\ \text{g}\,.\,\text{mol}^{-1}$; $M(\text{O}) = 16\ \text{g}\,.\,\text{mol}^{-1}$.

♦♦ 24.8 Acide valérique

L'acide valérique est un acide carboxylique à chaîne carbonée linéaire saturée ; il se trouve à l'état naturel dans la racine de valériane. On désire connaître sa formule.
La combustion complète d'une mole de cette substance nécessite 6,5 moles de dioxygène et produit un nombre égal de moles de dioxyde de carbone et d'eau. Le pourcentage massique en oxygène est de 31,4 %.

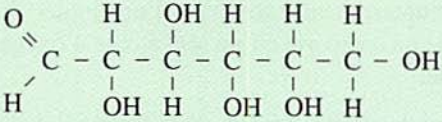
1° En notant $C_xH_yO_z$ la formule brute du composé recherché, écrire l'équation-bilan de sa combustion complète.

2° À l'aide des données de l'énoncé, établir les trois relations qui relient x, y et z.

3° Calculer x, y et z.

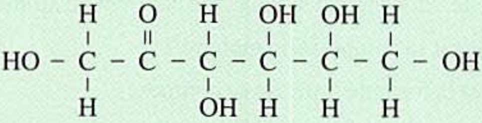
4° Écrire la formule développée de cet acide et son nom systématique.

24.1 1° • **Glucose** :



Le glucose présente un groupe carbonyle (fonction aldéhyde), quatre fonctions alcool secondaire et une fonction alcool primaire.

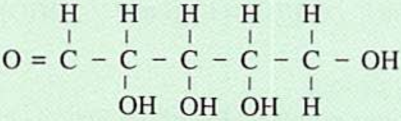
• **Fructose** :



$$\mathrm{HO}-\overset{\mathrm{H}}{\underset{\mathrm{H}}{\mathrm{C}}}-\overset{\mathrm{O}}{\overset{\|}{\mathrm{C}}}-\overset{\mathrm{H}}{\underset{\mathrm{OH}}{\mathrm{C}}}-\overset{\mathrm{OH}}{\underset{\mathrm{H}}{\mathrm{C}}}-\overset{\mathrm{OH}}{\underset{\mathrm{H}}{\mathrm{C}}}-\overset{\mathrm{H}}{\underset{\mathrm{H}}{\mathrm{C}}}-\mathrm{OH}$$

Le fructose présente une fonction cétone, deux fonctions alcool primaire et trois fonctions alcool secondaire.

• **Ribose** :

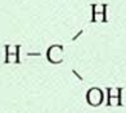


$$\mathrm{O}=\overset{\mathrm{H}}{\mathrm{C}}-\overset{\mathrm{H}}{\underset{\mathrm{OH}}{\mathrm{C}}}-\overset{\mathrm{H}}{\underset{\mathrm{OH}}{\mathrm{C}}}-\overset{\mathrm{H}}{\underset{\mathrm{OH}}{\mathrm{C}}}-\overset{\mathrm{H}}{\underset{\mathrm{H}}{\mathrm{C}}}-\mathrm{OH}$$

Le ribose présente une fonction aldéhyde, une fonction alcool primaire et trois fonctions alcool secondaire.

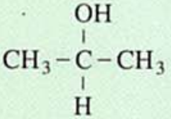
2° **Fructose** et **glucose** sont deux isomères de fonctions. Ils ont même formule brute.

24.2 *a*)



primaire ;

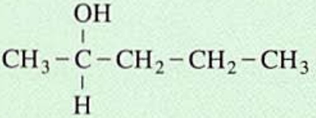
b)



$$\mathrm{CH_3}-\overset{\mathrm{OH}}{\underset{\mathrm{H}}{\mathrm{C}}}-\mathrm{CH_3}$$

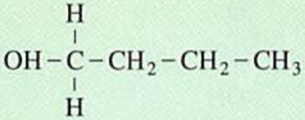
secondaire ;

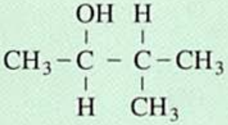
c)

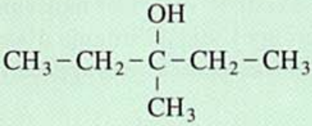


$$\mathrm{CH_3}-\overset{\mathrm{OH}}{\underset{\mathrm{H}}{\mathrm{C}}}-\mathrm{CH_2}-\mathrm{CH_2}-\mathrm{CH_3}$$

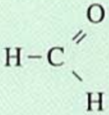
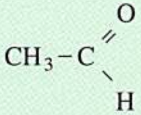
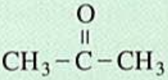
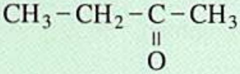
secondaire ;

d) 
$\mathrm{OH-\overset{H}{\underset{H}{C}}-CH_2-CH_2-CH_3}$ primaire ;

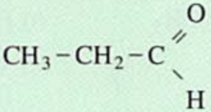
e) 
$\mathrm{CH_3-\overset{OH}{\underset{H}{C}}-\overset{H}{\underset{CH_3}{C}}-CH_3}$ secondaire ;

f) 
$\mathrm{CH_3-CH_2-\overset{OH}{\underset{CH_3}{C}}-CH_2-CH_3}$ tertiaire.

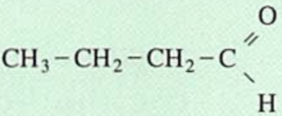
24.3 1°

- **méthanal** : 
- **éthanal** : 
- **propanone** : 
$\mathrm{CH_3-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-CH_3}$
- **butan – 2 – one (butanone)** : 
$\mathrm{CH_3-CH_2-\underset{O}{\underset{\|}{C}}-CH_3}$

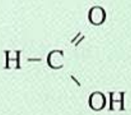
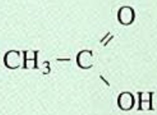
2° La propanone a comme isomère le **propanal** :

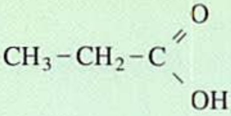


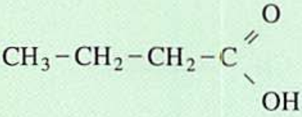
La butan – 2 – one a comme isomère le **butanal** :



24.4 1°

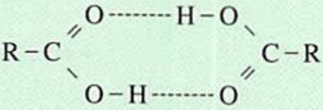
- **acide formique** : 
- **acide acétique** : 

- **acide propionique** : 

- **acide butyrique** : 

2° Comme les molécules d'eau et d'alcool R – OH , les molécules d'acide contiennent le groupe – OH . Ces groupes sont à l'origine d'associations moléculaires par l'intermédiaire de liaisons particulières appelées « liaisons hydrogènes » .

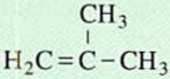
Les molécules d'acide carboxylique sont associées entre elles par liaison hydrogène :



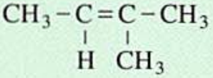
C'est pourquoi les températures de fusion et d'ébullition sont plus élevées que celles des alcanes correspondants car il faut apporter de l'énergie pour détruire ces liaisons. Ces molécules peuvent donner des liaisons hydrogène avec les molécules d'eau. C'est pourquoi les acides sont miscibles à l'eau (caractère hydrophile).

24.5 1°

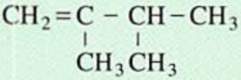
a) $CH_2=CH-CH_2-CH_3$

b) 

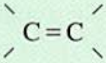
$H_2C=\overset{\overset{CH_3}{|}}{C}-CH_3$

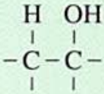
c) 

$CH_3-\underset{\underset{H}{|}}{C}=\underset{\underset{CH_3}{|}}{C}-CH_3$

d) 

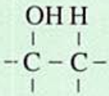
$CH_2=\underset{\underset{CH_3}{|}}{C}-\underset{\underset{CH_3}{|}}{CH}-CH_3$

2° L'addition se fait sur la double liaison  et peut donner deux possibilités :



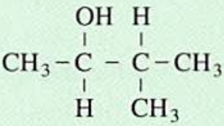
$-\overset{\overset{H}{|}}{\underset{|}{C}}-\overset{\overset{OH}{|}}{\underset{|}{C}}-$

ou



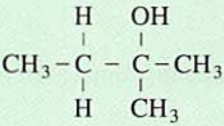
$-\overset{\overset{OH}{|}}{\underset{|}{C}}-\overset{\overset{H}{|}}{\underset{|}{C}}-$

Par exemple, sur l'alcène *c)* :



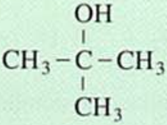
$CH_3-\overset{\overset{OH}{|}}{\underset{\underset{H}{|}}{C}}-\overset{\overset{H}{|}}{\underset{\underset{CH_3}{|}}{C}}-CH_3$

ou

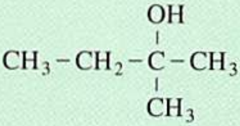


$CH_3-\overset{\overset{H}{|}}{\underset{\underset{H}{|}}{C}}-\overset{\overset{OH}{|}}{\underset{\underset{CH_3}{|}}{C}}-CH_3$

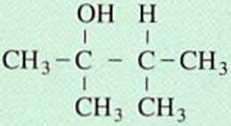
3° *a*) $CH_3-CHOH-CH_2-CH_3$: **butan – 2 – ol (secondaire).**

b) 

$CH_3-\overset{OH}{\underset{CH_3}{C}}-CH_3$: **2 – méthylpropan – 2 – ol (tertiaire).**

c) 

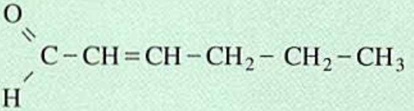
$CH_3-CH_2-\overset{OH}{\underset{CH_3}{C}}-CH_3$: **2 – méthylbutan – 2 – ol (tertiaire).**

d) 

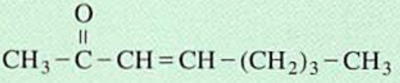
$CH_3-\overset{OH}{\underset{CH_3}{C}}-\overset{H}{\underset{CH_3}{C}}-CH_3$: **2,3 – diméthylbutan – 2 – ol**.

Lors de l'hydratation d'un alcène, le groupe OH se fixe prioritairement sur le carbone de la double liaison le plus ramifié (carbone le moins hydrogéné).

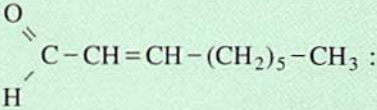
24.6 1°



: **hex – 2 – énal** ;

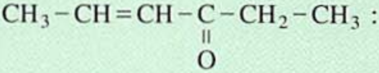


$CH_3-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-CH=CH-(CH_2)_3-CH_3$: **oct – 3 – ène – 2 – one** ;



: **non – 2 – énal.**

2° • Pour le premier :



$CH_3-CH=CH-\underset{\underset{O}{\|}}{C}-CH_2-CH_3$: **hex – 4 – ène – 3 – one.**

• Pour le second :

$CHO-CH_2-CH=CH-(CH_2)_3-CH_3$: **oct – 3 – énal.**

• Pour le troisième :

$CH_3-CH=CH-(CH_2)_5-CHO$: **non – 7 – énal.**

24.7 1° *a*) La combustion de cette molécule obéit à l'équation-bilan suivante :

$$C_xH_yO + \left(x + \frac{y}{4} - \frac{1}{2}\right)O_2 \rightarrow x\,CO_2 + \frac{y}{2}\,H_2O.$$

Déterminons les quantités de CO_2 et H_2O produites par combustion :

- $n\,(CO_2) = \dfrac{V(CO_2)}{V_m} = \dfrac{14{,}4}{24} = 0{,}6$ mol ;
- $n\,(H_2O) = \dfrac{9}{18} = 0{,}5$ mol .

Tout le carbone présent initialement dans l'échantillon de masse m de ce composé est devenu du dioxyde de carbone :

$$\%\,C = 100 \times \frac{m(C)}{m} = 100 \times \frac{12 \times 0{,}6}{9{,}8} = \mathbf{73{,}5\ \%}\ .$$

Tout l'hydrogène de l'eau provient de l'échantillon :

$$\%\,H = 100 \times \frac{0{,}5 \times 2}{9{,}8} = \mathbf{10{,}2\ \%}\ .$$

Donc le pourcentage massique en oxygène est égal à :

$$100 - 10{,}2 - 73{,}5 = 16{,}3\ \%\ .$$

b) Écrivons la formule brute de ce composé sous la forme C_xH_yO :

$$\frac{\%\,C}{12x} = \frac{\%\,H}{y} = \frac{\%\,O}{16} = \frac{100}{M}.$$

Or le pourcentage en O est égal à 16,3 , donc :

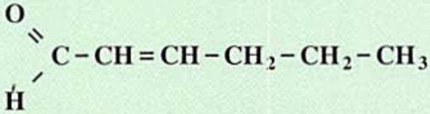
$$x = \frac{\%\,C}{\%\,O} \times \frac{16}{12} = 6 \text{ et } y = \frac{16}{1} \times \frac{10{,}2}{16{,}3} = 10\ .$$

$$M = \frac{100 \times 16}{16{,}3} = 98\ .$$

La masse molaire est $M = \mathbf{98\ g\ .\ mol^{-1}}$.

c) La formule brute du composé est $\mathbf{C_6H_{10}O}$.

2° La fonction aldéhyde ne peut être qu'en bout de chaîne.
La formule développée de la molécule est donc :



$$\mathrm{O{=}C(H){-}CH{=}CH{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_3}$$

Son nom est **hex – 2 – énal** .
énal est la contraction de **ène** pour alcène, et **al** pour aldéhyde puisque la molécule comporte les deux fonctions.

24.8 1° $C_xH_yO_z + \left(\frac{4x+y-2z}{4}\right)O_2 \rightarrow x\,CO_2 + \frac{y}{2}\,H_2O$.

2° • La combustion donne autant de moles de dioxyde de carbone et d'eau, soit :

$$\mathbf{y = 2x} \quad (1).$$

• La combustion d'une mole nécessite 6,5 moles de O_2 :

$$\frac{4x+y-2z}{4} = 6{,}5,$$

soit :

$$\mathbf{4x + y - 2z = 26} \quad (2).$$

• Écrivons la loi sur les proportions massiques :

$$\frac{\%\,C}{12x} = \frac{\%\,H}{y} = \frac{\%\,O}{16z} = \frac{100}{16z+12x+y}, \quad \text{avec } \%\,O = 31{,}4 .$$

Donc $16z + 12x + y = \frac{16z \times 100}{31{,}4} = 50{,}96z \approx 51z$,

soit :

$$\mathbf{12x + y = 35z} \quad (3).$$

3° Avec $y = 2x$, il vient :

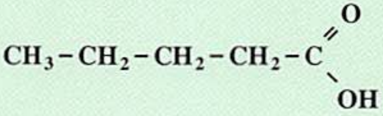
• en portant dans (2) : $6x - 2z = 26$,

• en portant dans (3) : $14x = 35z$;

soit :

$$\mathbf{z = 2}, \ \mathbf{x = 5} \ \text{et} \ \mathbf{y = 10}.$$

4° $C_5H_{10}O_2$;



$CH_3-CH_2-CH_2-CH_2-C(=O)-OH$ **: acide pentanoïque.**

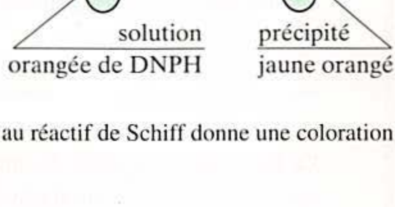
25

OXYDATION DE COMPOSÉS ORGANIQUES

RÉSUMÉ DU COURS

Test des composés carbonylés

■ *Caractérisation du groupe carbonyle* : test à la 2,4 dinitrophénylhydrazine (DNPH).


composé carbonylé
solution orangée de DNPH
précipité jaune orangé

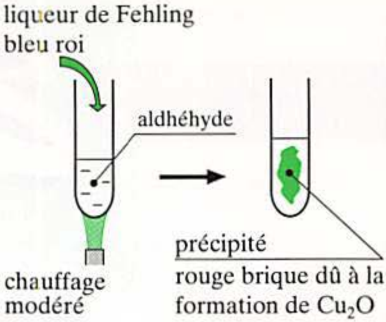
■ *Caractérisation d'un aldéhyde :* le test au réactif de Schiff donne une coloration rouge fuschia en présence d'un aldéhyde.

■ **Propriétés réductrices des aldéhydes**

Caractérisation des aldéhydes :

- milieu basique : $R-CHO + 3\,OH^- \rightarrow R-COO^- + 2\,H_2O + 2\,e^-$;
- milieu acide : $R-CHO + H_2O \rightarrow R-COOH + 2\,e^- + 2\,H^+$.

Test à la liqueur de Fehling : ions complexes notés CuT_2^{2-} formés d'ions Cu^{2+} et d'ions tartrate notés T^{2-}.

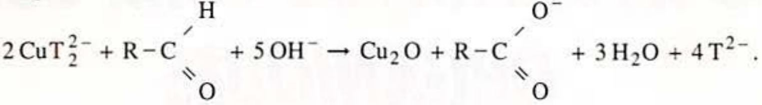

liqueur de Fehling
bleu roi
aldhéhyde
précipité
rouge brique dû à la
formation de $\mathrm{Cu_2O}$
chauffage
modéré

- Couples en présence :

$$2\,\mathrm{CuT}_2^{2-} + 2\,\mathrm{OH}^- + 2\,e^- \rightarrow \mathrm{Cu_2O} + 4\,\mathrm{T}^{2-} + \mathrm{H_2O}.$$

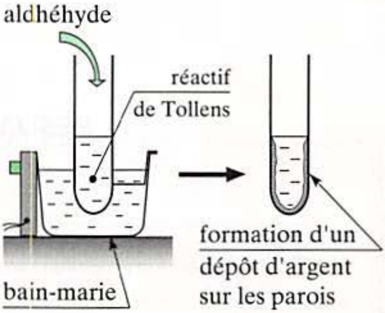
$$\mathrm{R-CHO} + 3\,\mathrm{OH}^- \rightarrow \mathrm{R-COO}^- + 2\,\mathrm{H_2O} + 2\,e^-.$$

- Équation-bilan :



$$2\,\mathrm{CuT}_2^{2-} + \mathrm{R-C}\begin{matrix}\diagup \mathrm{H}\\ \diagdown\!\!\diagdown \mathrm{O}\end{matrix} + 5\,\mathrm{OH}^- \rightarrow \mathrm{Cu_2O} + \mathrm{R-C}\begin{matrix}\diagup \mathrm{O}^-\\ \diagdown\!\!\diagdown \mathrm{O}\end{matrix} + 3\,\mathrm{H_2O} + 4\,\mathrm{T}^{2-}.$$

Test à l'ion diammine-argent (I) : solution de l'ion $\mathrm{Ag(NH_3)_2^+}$ (réactif de Tollens).


aldhéhyde
réactif
de Tollens
formation d'un
dépôt d'argent
sur les parois
bain-marie

- Couple du réactif :
  $\mathrm{Ag(NH_3)_2^+} + e^- \rightarrow \mathrm{Ag} + 2\mathrm{NH_3}.$
- Équation-bilan :

$$2\,\mathrm{Ag(NH_3)_2^+} + \mathrm{R-CHO} + 3\,\mathrm{OH}^- \rightarrow 2\,\mathrm{Ag} + \mathrm{RCOO}^- + 4\,\mathrm{NH_3} + 2\,\mathrm{H_2O}.$$

Ces deux tests sont sans effet sur les cétones.

Remarque : la formation d'un acide peut être mise en évidence soit par l'action du chlorure d'ammonium (il y a un dégagement d'ammoniaque), soit à l'aide d'un papier pH.

Oxydation catalytique des alcools

Oxydation par le dioxygène (lampe sans flamme)

Le dioxygène, en présence de cuivre, oxyde suivant une réaction très exothermique :

- un alcool primaire en un aldéhyde puis en un acide carboxylique :

$$\mathrm{R-CH_2OH} + \frac{1}{2}\mathrm{O_2} \rightarrow \mathrm{R-CHO} + \mathrm{H_2O},$$

puis

$$\mathrm{R-CHO} + \frac{1}{2}\mathrm{O_2} \xrightarrow{\mathrm{Cu}} \mathrm{R-COOH};$$

- un alcool secondaire en cétone :

$$R-CHOH-R' + \frac{1}{2}O_2 \xrightarrow{Cu} R-CO-R' + H_2O.$$

En revanche, un alcool tertiaire ne réagit pas dans ces conditions.

■ Par déshydrogénation catalytique

À haute température, sur un catalyseur de cuivre et en l'absence de dioxygène, une réaction endothermique de déshydrogénation produit :

- avec un alcool primaire, un aldéhyde :

$$R-CH_2OH \xrightarrow{Cu} R-CHO \quad + \overset{\uparrow}{H}_2;$$

- avec un alcool secondaire, une cétone :

$$R-CHOH-R' \xrightarrow{Cu} R-CO-R' + \overset{\uparrow}{H}_2.$$

■ Autres oxydations ménagées des alcools

Des oxydants tels que le couple MnO_4^-/Mn^{2+} ou le couple $Cr_2O_7^{2-}/Cr^{3+}$ peuvent oxyder les alcools.

$Cr_2O_7^{2-} + 14\,H^+ + 6\,e^- \rightarrow 2\,Cr^{3+} + 7\,H_2O;\ E^0 = 1{,}33\ V.$

$MnO_4^- + 8\,H^+ + 5\,e^- \rightarrow Mn^{2+} + 4\,H_2O;\ E^0 = 1{,}51\ V.$

Les alcools primaires sont oxydés en aldéhydes selon :

$$R-CH_2OH \rightarrow R-CHO + 2\,e^- + 2\,H^+.$$

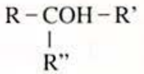
Les aldéhydes sont oxydés en acides selon :

$$R-CHO + H_2O \rightarrow R-COOH + 2\,e^- + 2\,H^+.$$

Les alcools secondaires sont oxydés en cétones selon :

$$R-CHOH-R' \rightarrow R-CO-R' + 2\,e^- + 2\,H^+.$$

Les potentiels normaux de ces réactions d'oxydoréduction sont voisins de 0 V et dépendent de la nature des radicaux R et R'.

	$R-CH_2OH$	$R-CHOH-R'$	 $R-\underset{\underset{R''}{\vert}}{C}OH-R'$
Oxydant en défaut	$R-CHO$	$R-CO-R'$	pas de réaction
Oxydant en excès	$R-COOH$	$R-CO-R'$	pas de réaction

Une solution de permanganate violette est décolorée par action d'un alcool secondaire ou primaire en excès.

Tests d'identification

25.1 Réactions caractéristiques de composés oxygénés

Recopier le tableau ci-dessous et placer une croix dans chaque case lorsqu'une réaction chimique se produit.

	propanal	propanone	propan-1-ol	propan-2-ol	2-méthyl-propan-2-ol
Combustion					
Test à la DNPH					
Réduction de la liqueur de Fehling					
Expérience de la lampe sans flamme					
Déshydrogénation catalytique					
Action de MnO_4^- en excès					

25.2 Identification de divers alcools

On veut s'assurer du contenu de trois flacons contenant chacun un seul alcool parmi :
le butan – 1 – ol , le butan – 2 – ol et le 2 – méthylpropan – 2 – ol.
On réalise l'expérience avec l'ion permanganate en milieu acide ; seuls les flacons (2) et (3) provoquent une décoloration de la solution de permanganate. Les solutions décolorées sont testées ; celle obtenue avec le flacon (2) donne un précipité rouge brique avec la liqueur de Fehling alors que l'autre solution ne donne rien.

1° Attribuer chaque flacon à l'alcool qu'il contient.

2° Écrire les équations-bilan des différentes réactions mises en jeu dans ces tests.

25.3 Alcools isomères

Un composé oxygéné a pour formule brute $C_4H_{10}O$.

1° Donner le nom et la formule semi-développée des alcools isomères.

2° On dispose au laboratoire des produits suivants :

- un oxydant en milieu acide : le dichromate de potassium ($Cr_2O_7^{2-}/Cr^{3+}$) ;

- le réactif à la 2,4 – dinitrophénylhydrazine ;
- le réactif de Tollens ($Ag(NH_3)_2^+/Ag$) ;
- un papier indicateur de pH.

a) Imaginer un nombre minimum de tests afin de répartir les alcools cités en trois classes.

b) Écrire les équations-bilan des réactions mises en jeu lors des tests avec le dichromate de potassium et le réactif de Tollens.

25.4 Recherche d'un produit formé

L'hydratation d'un alcène ne conduit qu'à un seul composé monoxygéné A renfermant 21,6 % en masse d'oxygène.

1° Déterminer la formule brute de A. Écrire les formules développées des différents isomères de A.

2° Le produit A est oxydé en milieu acide par le dichromate de potassium. Le composé B obtenu réagit avec la DNPH mais ne réagit pas avec le réactif de Tollens. En déduire la formule développée et le nom de B.

3° Donner la formule développée et le nom de l'alcène de départ.

Données des masses molaires :
$M(H) = 1\ g.mol^{-1}$; $M(C) = 12\ g.mol^{-1}$; $M(O) = 16\ g.mol^{-1}$.

Application des énergies de liaisons

Données des énergies de liaisons pour les exercices suivants :

liaison	C−H	C−O	C=O	O−H	H−H	O=O
D (kJ.mol^{-1})	410	356	795	460	432	494

♦ 25.5 Bilan thermique de l'oxydation du méthanol

Le méthanol est hautement toxique ; l'exposition prolongée à ses vapeurs peut provoquer la cécité.

On pense que cette toxicité est due à son oxydation métabolique en méthanal et en acide formique.

On réalise l'expérience de la lampe sans flamme avec du méthanol.

On sépare les produits formés, par distillation fractionnée.

1° Indiquer les noms des produits formés.

2° Indiquer les noms des différents tests qui permettraient de mettre en évidence les produits formés.

3° *a*) Indiquer les liaisons détruites et les liaisons formées lors des réactions possibles.

b) Calculer les chaleurs de réaction Q_r de ces deux réactions.

♦ 25.6 Déshydrogénation catalytique de l'éthanol

L'alcool éthylique commercial est employé comme solvant dans les parfums, les vernis, et comme intermédiaire de synthèse. Il est aussi utilisé comme additif de l'essence.

L'alcool éthylique destiné à la consommation humaine est préparé par fermentation des sucres et des amidons catalysée par des enzymes.

On fait passer des vapeurs d'éthanol à haute température sur du cuivre en l'absence de dioxygène.

1° Écrire l'équation-bilan de la déshydrogénation catalytique de l'éthanol.

2° Quels sont les tests qui permettraient de mettre en évidence les produits formés ?

3° *a*) Faire un inventaire des ruptures de liaisons et des formations de liaisons au cours de la réaction.

b) À partir des énergies de liaisons, calculer la chaleur de réaction de cette réaction. Conclure.

♦ 25.7 Oxydation du propan – 2 – ol

Le propan – 2 – ol est toxique, mais, à l'inverse du méthanol, il n'est pas absorbé par la peau. Il est de ce fait employé comme alcool de friction. On l'utilise également comme solvant.

1° Le dioxygène en phase gazeuse et en présence de cuivre oxyde le propan – 2 – ol.

a) Écrire l'équation-bilan de cette réaction.

b) Calculer la chaleur de réaction pour une mole de cet alcool.

2° En l'absence de dioxygène, à haute température et en présence de cuivre, le propan – 2 – ol subit une déshydrogénation.

a) Écrire l'équation-bilan de cette réaction.

b) Calculer la chaleur de réaction pour une mole de cet alcool.

♦♦ 25.8 Oxydation incomplète du butan – 1 – ol

On procède à l'oxydation par le dioxygène d'une certaine masse de butan – 1 – ol en présence de cuivre porté à haute température.
La réaction étant terminée, on condense les vapeurs formées.

Après élimination de l'eau formée, on sépare par distillation les composants du condensat. On obtient :

- 12,0 g de produit *A* ; cette substance réagit sur la liqueur de Fehling et décolore le permanganate de potassium ;
- 7,4 g de produit *B* ; il ne réagit pas avec la DNPH mais décolore le permanganate de potassium en milieu acide ;
- 4,4 g de produit *C* ; ce produit est sans action sur la DNPH et le permanganate de potassium mais sa solution aqueuse est acide.

1° Écrire les équations-bilan de ces réactions.

2° Donner les noms des produits *A* , *B* et *C* .

3° Déterminer les quantités des trois composés organiques obtenus.

4° Déterminer la quantité de chaleur libérée au contact du cuivre.

Données :
$M(\text{H}) = 1\ \text{g}\,.\,\text{mol}^{-1}$; $M(\text{C}) = 12\ \text{g}\,.\,\text{mol}^{-1}$; $M(\text{O}) = 16\ \text{g}\,.\,\text{mol}^{-1}$.

Oxydation sélective

♦♦ 25.9 Le glucose

Le glucose a pour formule :

$$CH_2OH - CHOH - CHOH - CHOH - CHOH - CHO\,.$$

1° *a*) Dans une solution de liqueur de Fehling bleu roi, on verse quelques gouttes de solution de glucose. On chauffe modérément cette préparation. Que se passe-t-il ?

b) Écrire l'équation-bilan de cette réaction.

c) Le glucose réagit-il au test à la DNPH ?

2° On fait réagir sur du glucose un oxydant, par exemple l'ion permanganate en milieu acide. Seule la fonction aldéhyde est oxydée.
Écrire la réaction d'oxydoréduction.

3° Avec un oxydant plus énergique, on aboutit à une attaque de la fonction alcool primaire en plus de celle du groupe aldéhyde. On obtient un acide dicarboxylique.
Écrire la formule semi-développée du corps obtenu.

25.1

	propanal	propanone	propan-1-ol	propan-2-ol	2-méthyl-propan-2-ol
Combustion	×	×	×	×	×
Test à la DNPH	×	×			
Réduction de la liqueur de Fehling	×				
Expérience de la lampe sans flamme	×		×	×	
Déshydrogénation catalytique	×		×	×	
Action de MnO_4^- en excès	×		×	×	

25.2 1° • Alcool primaire : butan-1-ol ;

• Alcool secondaire : butan-2-ol ;

• Alcool tertiaire : 2-méthylpropan-2-ol.

Seul un alcool tertiaire ne réagit pas avec le permanganate de potassium.

Donc **le flacon n°1 contient du 2-méthylpropan-2-ol.**

L'action de l'ion permanganate en milieu acide sur un alcool primaire donne un mélange d'aldéhyde et d'acide carboxylique.

Le flacon n° 2 contient donc le butan-1-ol, puisque la solution décolorée qui réagit avec la liqueur de Fehling contient de l'aldéhyde.

Avec l'alcool secondaire, le permanganate donne une cétone qui ne réagit pas avec la liqueur de Fehling. **Le flacon n° 3 contient le propan-2-ol.**

2° ▪ Écrivons les équations des demi-réactions électroniques :

• Réduction des ions permanganate :

$$MnO_4^- + 5\,e^- + 8\,H^+ \rightarrow Mn^{2+} + 4\,H_2O.$$

• Oxydation du butan-1-ol :

$$CH_3-(CH_2)_2-CH_2OH \rightarrow CH_3-(CH_2)_2-CHO + 2\,e^- + 2\,H^+.$$

• Oxydation du butanal :

$$CH_3-(CH_2)_2-CHO + H_2O \rightarrow CH_3-(CH_2)_2-COOH + 2\,e^- + 2\,H^+.$$

• Oxydation du butan-2-ol :

$$C_2H_5-CHOH-CH_3 \rightarrow C_2H_5-CO-CH_3 + 2\,e^- + 2\,H^+.$$

■ Équations-bilan :

- Action sur le butan-1-ol :

$$5\,CH_3-(CH_2)_2-CH_2OH + 2\,MnO_4^- + 6\,H^+ \rightarrow 2\,Mn^{2+} + 8\,H_2O + 5\,CH_3-(CH_2)_2-CHO.$$

On obtient du butanal qui est ensuite oxydé en acide butanoïque :

$$5\,CH_3-(CH_2)_2-CHO + 2\,MnO_4^- + 6\,H^+ \rightarrow 2\,Mn^{2+} + 3\,H_2O + 5\,CH_3-(CH_2)_2-COOH.$$

- Action sur le butan-2-ol :

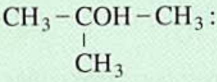
$$5\,C_2H_5-CHOH-CH_3 + 2\,MnO_4^- + 6\,H^+ \rightarrow 2\,Mn^{2+} + 8\,H_2O + 5\,C_2H_5-CO-CH_3.$$

- Action de $CH_3-(CH_2)_2-CHO$ sur la liqueur de Fehling :

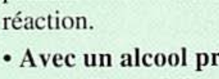
$$CH_3-(CH_2)_2-CHO + 2\,CuT_2^{2-} + 2\,OH^- \rightarrow CH_3-(CH_2)_2-COOH + 2\,H^+ + Cu_2O + 4\,T^{2-}.$$

25.3 1°

- $CH_3-CH_2-CH_2-CH_2OH$: butan-1-ol, **alcool primaire** ;
- $CH_3-CH_2-CHOH-CH_3$: butan-2-ol, **alcool secondaire** ;



- $CH_3-\underset{\substack{|\\ CH_3}}{C}OH-CH_3$: 2-méthylpropan-2-ol, **alcool tertiaire** ;



- $CH_3-\underset{\substack{|\\ CH_2OH}}{C}H-CH_3$: 2-méthylpropan-1-ol, **alcool primaire**.

2° *a*) Le dichromate de potassium réagit sur les alcools primaires et secondaires. Il ne réagit pas avec l'alcool tertiaire. Pour distinguer l'alcool primaire de l'alcool tertiaire, il faut ensuite tester les produits de cette réaction.

- **Avec un alcool primaire**, on obtient un mélange d'aldéhyde et d'acide carboxylique si l'oxydant est en défaut. Le test au réactif de Tollens confirme la présence de l'aldéhyde : le papier pH permet de montrer que la solution est acide.

- En revanche, **avec l'alcool secondaire**, on obtient une cétone. Le test positif à la DNPH et l'absence de réaction avec le réactif de Tollens confirment la présence d'une cétone dans les produits de l'oxydation.

Avec le papier pH, on vérifie qu'il n'y a pas eu production d'acide carboxylique.

b) ■ Écrivons la demi-réaction électronique correspondant à la réduction du dichromate de potassium :

$$Cr_2O_7^{2-} + 6\,e^- + 14\,H^+ \rightarrow 2\,Cr^{3+} + 7\,H_2O\,.$$

- Oxydation de l'alcool primaire :

$$3\,R-CH_2OH + Cr_2O_7^{2-} + 8\,H^+ \rightarrow 3\,R-CHO-2\,Cr^{3+} + 7\,H_2O\,.$$

- Oxydation de l'aldéhyde obtenu par la réaction précédente :

$$3\,RCHO + Cr_2O_7^{2-} + 8\,H^+ \rightarrow 3\,RCOOH + 2\,Cr^{3+} + 4\,H_2O\,.$$

- Oxydation de l'alcool secondaire :

$$3\,R-CHOH-R' + Cr_2O_7^{2-} + 8\,H^+ \rightarrow 3\,R-CO-R' + 2\,Cr^{3+} + 7\,H_2O\,.$$

■ Réaction de l'aldéhyde avec le réactif de Tollens :

$$Ag(NH_3)_2^+ + e^- \rightarrow Ag + 2\,NH_3\,.$$

$$R-CHO + 3\,OH^- \rightarrow 2\,H_2O + R-COO^- + 2\,e^-\,.$$

$$2\,Ag(NH_3)_2^+ + R-CHO + 3\,OH^- \rightarrow 2\,Ag + 4\,NH_3 + 2\,H_2O + R-COO^-\,.$$

25.4 1° Le composé obtenu provient de l'addition d'une molécule d'eau sur un alcène de formule C_nH_{2n} ; on obtient un alcool :

$$C_nH_{2n} + H_2O \rightarrow C_nH_{2n+1}OH\,.$$

Sa formule brute est donc de la forme $C_nH_{2n+2}O$.

Écrivons la loi de proportionnalité sur les pourcentages massiques :

$$\frac{\%\,C}{12n} = \frac{\%\,H}{2n+2} = \frac{\%\,O}{16} = \frac{100}{14n+18}\,.$$

Or, le % en O est de 21,6 :

$14n + 18 = \dfrac{100 \times 16}{21{,}6}$, soit $n = 4$; **formule brute : $C_4H_{10}O$**.

Les différents isomères correspondant à la fonction alcool sont ceux de l'exercice **25.3**.

2° Le produit *B* obtenu par action du dichromate de potassium est une cétone puisqu'il réagit avec le DNPH mais ne réagit pas avec le réactif de Tollens.

B **: $CH_3-CO-CH_2-CH_3$, butanone**, seule cétone en C_4.

3° Le produit *B* provient donc d'un alcool secondaire.

A **: $CH_3-CHOH-CH_2-CH_3$, butan – 2 – ol**, seul alcool secondaire en C_4.

L'alcène de départ est donc : **$CH_3-CH=CH-CH_3$, but-2-ène**. En effet, cet alcène ne peut donner qu'un seul composé par hydratation.

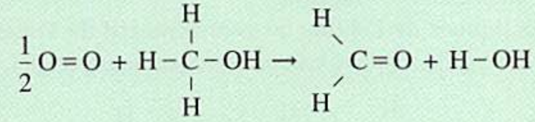
25.5 1° Dans l'expérience de la lampe sans flamme, l'alcool primaire est oxydé en aldéhyde et en acide carboxylique :

$$\frac{1}{2}O_2 + CH_3OH \rightarrow HCHO + H_2O \quad (1)\ \textbf{méthanal} ;$$

$$HCHO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow HCOOH \quad (2)\ \textbf{acide formique}.$$

2° La présence de méthanal est mise en évidence par le **test à la liqueur de Fehling** ou le **réactif de Tollens**. Un **papier pH** montre que le milieu est devenu acide : il y a eu formation d'acide formique.

3° *a)* ■ **Pour la réaction (1) :**

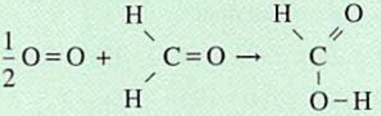


(1)

• Il y a **rupture** de : 1 mole de liaison C − H ;
1 mole de liaison C − O ;
$\frac{1}{2}$ mole de liaison O = O .

• Il y a **formation** de : 1 mole de liaison C = O ;
1 mole de liaison H − O .

■ **Pour la réaction (2) :**



(2)

• Il y a **rupture** de : 1 mole de liaison C − H ;
$\frac{1}{2}$ mole de liaison O = O .

• Il y a **formation** de : 1 mole de liaison O − H ;
1 mole de liaison C − O .

b) • La chaleur de réaction Q_{r1} est donc égale à :

$$Q_{r1} = \frac{1}{2}D(O=O) + D(C-O) + D(C-H) - D(O-H) - D(C=O),$$

d'où $Q_{r1} = \dfrac{494}{2} + 356 + 410 - 460 - 795 = -242$, soit $Q_{r_1} = -242$ **kJ . mol^{-1}** ; la réaction est **exothermique**.

- Pour la réaction (2) :

$$Q_{r_2} = D(\mathrm{C-H}) + \frac{1}{2}D(\mathrm{O=O}) - D(\mathrm{O-H}) - D(\mathrm{C-O}),$$

d'où $Q_{r_2} = 410 + \dfrac{494}{2} - 460 - 356 = -159$,

soit $Q_{r_2} = -159$ **kJ . mol^{-1}** ; la réaction est **exothermique**.

Remarque : si on considère la réaction globale :

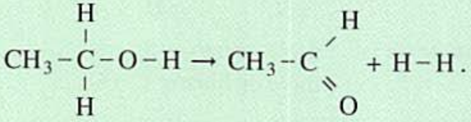
$\mathrm{O_2 + HCH_2OH \rightarrow HCOOH + H_2O}$, $Q_{r_3} = Q_{r_2} + Q_{r_1} = -401$ kJ . mol^{-1}.

25.6 1° $\mathrm{CH_3-CH_2OH \xrightarrow{Cu} CH_3-CHO + H_2}$.

2° Le dihydrogène est à l'état gazeux. L'éthanal est dans la phase liquide après condensation des vapeurs.

Test à la liqueur de Fehling ou avec **le réactif de Tollens**. L'absence de formation d'acide acétique est contrôlée par un papier pH, par exemple.

3° *a*)



$$\mathrm{CH_3-\overset{\displaystyle H}{\underset{\displaystyle H}{C}}-O-H \rightarrow CH_3-C}\begin{matrix}\diagup\mathrm{H}\\ \diagdown\!\!\diagdown\mathrm{O}\end{matrix} + \mathrm{H-H}.$$

- Il y a **rupture** de : 1 mole de liaison C – H ;
  1 mole de liaison C – O ;
  1 mole de liaison O – H.
- Il y a **formation** de : 1 mole de liaison C = O ;
  1 mole de liaison H – H.

b) La chaleur de réaction est donc :

$$Q_{r_2} = D(\mathrm{C-H}) + D(\mathrm{C-O}) + D(\mathrm{O-H}) - D(\mathrm{C=O}) - D(\mathrm{H-H}),$$

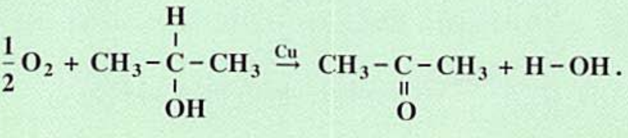
d'où $Q_{r_2} = 410 + 356 + 460 - 795 - 432 = -1$,

soit $Q_{r_2} = -1$ **kJ . mol^{-1} ; la réaction est faiblement exothermique**.

25.7 1° *a*) Le propan – 2 – ol ($\mathrm{CH_3-CHOH-CH_3}$) est un alcool secondaire ; l'oxydation catalytique conduit à une cétone :

la propanone ($\mathrm{CH_3-CO-CH_3}$).

Écrivons la réaction d'oxydation :



$$\frac{1}{2}\mathrm{O_2} + \mathrm{CH_3-\overset{\displaystyle H}{\underset{\displaystyle OH}{C}}-CH_3 \xrightarrow{Cu} CH_3-\underset{\displaystyle \overset{\|}{O}}{C}-CH_3 + H-OH}.$$

b) • Il y a **rupture** de : $\frac{1}{2}$ mole de liaison $O=O$;
1 mole de liaison $C-H$;
1 mole de liaison $C-O$.

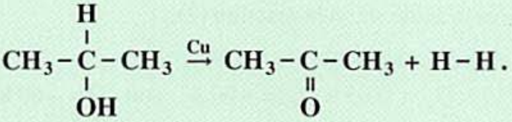
• Il y a **formation** de : 1 mole de liaison $H-O$;
1 mole de liaison $C=O$.

$Q_{r_1} = \frac{1}{2} D(O=O) + D(C-H) + D(C-O) - D(O-H) - D(C=O)$,

d'où $Q_{r_1} = \frac{1}{2}(494) + 410 + 356 - 460 - 795 = -242$,

soit $\boldsymbol{Q_{r_1} = -242\ \mathrm{kJ\,.\,mol^{-1}}}$.

2° *a*) La déshydrogénation conduit à la propanone avec production de dihydrogène.



$$CH_3-\overset{\displaystyle H}{\underset{\displaystyle OH}{C}}-CH_3 \xrightarrow{Cu} CH_3-\underset{\displaystyle O}{\overset{}{C}}-CH_3 + H-H.$$

• Il y a **rupture** de : 1 mole de liaison $C-H$;
1 mole de liaison $C-O$;
1 mole de liaison $O-H$.

• Il y a **formation** de : 1 mole de liaison $C=O$;
1 mole de liaison $H-H$.

b) La chaleur de réaction est donc :

$Q_{r_2} = D(C-H) + D(C-O) + D(O-H) - D(C=O) - D(H-H)$,

d'où $Q_{r_2} = 410 + 356 + 460 - 795 - 432 = -1$, soit $\boldsymbol{Q_{r_2} = -1\ \mathrm{kJ\,.\,mol^{-1}}}$.

25.8 1°

$$\mathbf{CH_3-CH_2-CH_2-CH_2OH + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CH_3-CH_2-CH_2-CHO + H_2O} \quad (1).$$

$$\mathbf{CH_3-CH_2-CH_2-CHO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CH_3-CH_2-CH_2-COOH} \quad (2).$$

2° Le condensat contient donc :

- produit *A* : le **butanal** ;
- produit *B* : le **butan – 1 – ol** ; il reste du réactif ;
- produit *C* : l'**acide butanoïque**.

3° La masse molaire du butan – 1 – ol est de $74\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

Donc $n(B) = \mathbf{0{,}1\ mol}$, quantité de butan – 1 – ol n'ayant pas réagi.

Pour A : $n(A) = \dfrac{12}{72} = \dfrac{\mathbf{1}}{\mathbf{6}}$ **mol,**

$n(A) \approx 0{,}17$ mol provenant de l'oxydation de B.

Pour C : $n(C) = \dfrac{4{,}4}{88} = \mathbf{0{,}05\ mol}$ provenant de l'oxydation de butanal.

4° Il faut déterminer les chaleurs de réaction pour les réactions (1) et (2). On procédera de la même façon que pour l'exercice **25.5**.

$$Q_{r_1} = -242\ \text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1} \quad \text{et} \quad Q_{r_2} = -159\ \text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}.$$

Il y a formation de $\left(\dfrac{1}{6} + 0{,}05\right)$ mole d'aldéhyde selon la réaction (1), puis 0,05 mole d'acide selon la réaction (2).

La quantité de chaleur libérée est donc :

$Q = 0{,}217 \times Q_{r_1} + 0{,}05 \times Q_{r_2} = -60{,}4$, soit $\mathbf{Q \approx -60\ kJ}$.

25.9 1° *a*) Le glucose R – CHO possède une fonction aldéhyde ; il réagit donc sur la liqueur de Fehling.

Il y a **formation d'un précipité rouge de $\mathbf{Cu_2O}$**.

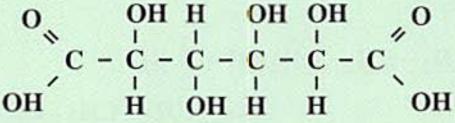
b)

$$\mathbf{2\,CuT_2^{2-} + R-CHO + 5\,OH^- \rightarrow Cu_2O + RCOO^- + 3\,H_2O + 4\,T^{2-}.}$$

c) Le glucose réagit avec la **DNPH** puisqu'il possède un groupe carbonyle.

2° $$\mathbf{2\,MnO_4^- + 6\,H^+ + 5\,R-CHO \rightarrow 2\,Mn^{2+} + 3\,H_2O + 5\,R-COOH.}$$

3°



QUELQUES CONSTANTES FONDAMENTALES *

quantité	symbole	valeur approchée	valeur actuelle
vitesse de la lumière dans le vide	c	3,00 . 10^{8} m . s^{-1}	299 792 458 m . s^{-1} (valeur exacte)
constante d'Avogadro	N_A	6,02 . 10^{23} mol^{-1}	6,022 136 7 (36) . 10^{23} mol^{-1}
constante gravitationnelle	G	6,67 . 10^{-11} N . m^{2} . kg^{-2}	6,672 59 (85) . 10^{-11} N . m^{2} . kg^{-2}
charge élémentaire	e	1,60 . 10^{-19} C	1,602 177 33 (49) . 10^{-19} C
masse de l'électron	m_e	9,11 . 10^{-31} kg = 0,000 549 u	9,109 389 7 (54) . 10^{-31} kg
masse du proton	m_p	1,672 6 . 10^{-27} kg = 1,007 28 u	1,672 623 1 (10) . 10^{-27} kg
masse du neutron	m_n	1,675 0 . 10^{-27} kg = 1,008 665 u	1,674 928 6 (10) . 10^{-27} kg
unité de masse atomique	u	1,660 5 . 10^{-27} kg = 931,5 MeV/c^{2}	1,660 540 2 (10) . 10^{-27} kg = 931,494 32 (28) MeV/c^{2}

---

* D'après le recueil des normes AFNOR, 1989. Les nombres entre parenthèses indiquent l'incertitude de la détermination expérimentale.

QUELQUES DONNÉES UTILES

• Grandeurs astronomiques

Terre

masse : $5{,}98 \,.\, 10^{24}$ kg
rayon moyen : $6{,}38 \,.\, 10^{6}$ m
distance moyenne de la Terre au Soleil : $1{,}50 \,.\, 10^{11}$ m
jour sidéral : 23 h 56 min 4 s = 86 164 s
jour solaire moyen : 24 h = 86 400 s
intensité de la pesanteur (à Paris) : $9{,}81$ N . kg^{-1}

Lune

masse : $7{,}4 \,.\, 10^{22}$ kg
rayon moyen : $1{,}74 \,.\, 10^{6}$ m
distance moyenne de la Terre à la Lune : $3{,}84 \,.\, 10^{8}$ m
période de révolution sidérale autour de la Terre : 27 j 7 h 43 min
période de rotation propre : 27 j 7 h 43 min
période de révolution synodique : 29 j 12 h 44 min

Soleil

masse : $1{,}99 \,.\, 10^{30}$ kg
rayon : $6{,}96 \,.\, 10^{8}$ m

• Puissances de dix

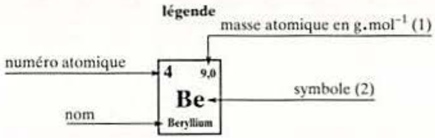
valeur	abréviation	préfixe
10^{-15}	f	femto
10^{-12}	p	pico
10^{-9}	n	nano
10^{-6}	µ	micro
10^{-3}	m	milli
10^{-2}	c	centi
10^{-1}	d	déci ...

valeur	abréviation	préfixe
...		
10	da	déca
10^{2}	h	hecto
10^{3}	k	kilo
10^{6}	M	méga
10^{9}	G	giga
10^{12}	T	téra

QUELQUES POTENTIELS STANDARD D'OXYDORÉDUCTION À 25 °C

oxydant	réducteur	E^0 (V)
F_2 (gaz)	F^-	2,87
$S_2O_8^{2-}$	SO_4^{2-}	2,01
H_2O_2	H_2O	1,77
MnO_4^-	MnO_2	1,69
BrO_3^-	Br_2	1,52
MnO_4^-	Mn^{2+}	1,51
Ce^{4+}	Ce^{3+}	1,44
Cl_2 (gaz)	Cl^-	1,36
$Cr_2O_7^{2-}$	Cr^{3+}	1,33
O_2 (gaz)	H_2O	1,23
IO_3^-	I_2 (aq)	1,19
Br_2	Br^-	1,07
NO_3^-	NO (gaz)	0,96
Ag^+	Ag	0,80
Fe^{3+}	Fe^{2+}	0,77
O_2 (gaz)	H_2O_2	0,68
I_2 (aq)	I^-	0,62
$Fe(CN)_6^{3-}$	$Fe(CN)_6^{4-}$	0,36
Cu^{2+}	Cu	0,34
SO_4^{2-}	SO_2 (gaz)	0,17
$S_4O_6^{2-}$	$S_2O_3^{2-}$	0,09
CH_3COOH	C_2H_5OH	0,05
H^+	H_2 (gaz)	0,00
SO_3^{2-}	$S_2O_4^{2-}$	−0,08
CO_2 (gaz)	$H_2C_2O_4$	−0,49

CLASSIFICATION PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS



notes : (1) basé sur le ^{12}C
(2) état physique du corps pur simple à 25°C et 1,013 bar :
noir = solide ; rouge = gaz ; vert = liquide ; violet = préparé par synthèse

période																		
I	1 1,0 H Hydrogène																	2 4,0 He Hélium
II	3 6,9 Li Lithium	4 9,0 Be Beryllium											5 10,8 B Bore	6 12,0 C Carbone	7 14,0 N Azote	8 16,0 O Oxygène	9 19,0 F Fluor	10 20,2 Ne Néon
III	11 23,0 Na Sodium	12 24,3 Mg Magnésium											13 27,0 Al Aluminium	14 28,1 Si Silcium	15 31,0 P Phosphore	16 32,1 S Soufre	17 35,5 Cl Chlore	18 39,9 Ar Argon
IV	19 39,1 K Potassium	20 40,1 Ca Calcium	21 45,0 Sc Scandium	22 47,9 Ti Titane	23 50,9 V Vanadium	24 52,0 Cr Chrome	25 54,9 Mn Manganèse	26 55,8 Fe Fer	27 58,9 Co Cobalt	28 58,7 Ni Nickel	29 63,5 Cu Cuivre	30 65,4 Zn Zinc	31 69,7 Ga Gallium	32 72,6 Ge Germanium	33 74,9 As Arsenic	34 79,0 Se Sélénium	35 79,9 Br Brome	36 83,8 Kr Krypton
V	37 85,5 Rb Rubidium	38 87,6 Sr Strontium	39 88,9 Y Yttrium	40 91,2 Zr Zirconium	41 92,9 Nb Niobium	42 95,9 Mo Molybdène	43 99 Tc Technétium	44 101,1 Ru Ruthénium	45 102,9 Rh Rhodium	46 106,4 Pd Palladium	47 107,9 Ag Argent	48 112,4 Cd Cadmium	49 114,8 In Indium	50 118,7 Sn Etain	51 121,8 Sb Antimoine	52 127,6 Te Tellure	53 126,9 I Iode	54 131,3 Xe Xénon
VI	55 132,9 Cs Césium	56 137,3 Ba Baryum	57 138,9 La Lanthane	72 178,5 Hf Hafnium	73 180,9 Ta Tantale	74 183,9 W Tungstène	75 186,2 Re Rhénium	76 190,2 Os Osmium	77 192,2 Ir Iridium	78 195,1 Pt Platine	79 197,0 Au Or	80 200,6 Hg Mercure	81 204,4 Tl Thallium	82 207,2 Pb Plomb	83 209,0 Bi Bismuth	84 210 Po Polonium	85 210 At Astate	86 222 Rn Radon
VII	87 223 Fr Francium	88 226 Ra Radium	89 227 Ac Actinium															
				VI	58 140,1 Ce Cérium	59 140,9 Pr Praséodyme	60 144,2 Nd Néodyme	61 145 Pm Prométhium	62 150,4 Sm Samarium	63 152,0 Eu Europium	64 157,3 Gd Gadolinium	65 158,9 Tb Terbium	66 162,5 Dy Dysprosium	67 164,9 Ho Holmium	68 167,3 Er Erbium	69 168,9 Tm Thulium	70 173,0 Yb Ytterbium	71 175,0 Lu Lutétium
				VII	90 232,0 Th Thorium	91 231,0 Pa Protactinium	92 238,0 U Uranium	93 237,0 Np Neptunium	94 242 Pu Plutonium	95 243 Am Américium	96 247 Cm Curium	97 247 Bk Berkélium	98 251 Cf Californium	99 254 Es Einsteinium	100 253 Fm Fermium	101 256 Md Mendélévium	102 254 No Nobélium	103 257 Lw Lawrencium